



Reverberação nas Salas do ISEP

CRISTIANE HUPALO

julho de 2017

REVERBERAÇÃO NAS SALAS DO ISEP

CRISTIANE HUPALO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL – RAMO DE CONSTRUÇÕES

Orientador: Duarte Barroso Lopes

JULHO DE 2017

ÍNDICE GERAL

Resumo.....	iii
Abstract	v
Agradecimentos	vii
Índice de Texto	ix
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xiii
Abreviaturas	xv
1 Introdução.....	1
2 Estado da Arte.....	5
3 Caso de Estudo.....	49
4 Resultados e Discussões.....	53
5 Considerações Finais.....	67
Referências Bibliográficas	69
Anexo I – Plantas de Revestimentos das Salas Analisadas.....	75
Anexo II – Tempos de Reverberação Teóricos	83

RESUMO

Com o passar do tempo, a exigência sobre as construções foi se tornando cada vez maior no quesito da economia, conforto, desempenho, entre outros. É neste contexto que a acústica é inserida como uma necessidade a ser atendida pelas construções. Esta deve atender a diversos parâmetros para que seja considerada como satisfatória, sendo o tempo de reverberação – objeto de estudo deste trabalho – um deles.

O tempo de reverberação está diretamente ligado ao entendimento das palavras dentro de um compartimento, ou seja, para que os ouvintes possam entender o locutor claramente, é necessário que o tempo de reverberação seja adequado. O ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto – como instituição de ensino demanda de ambientes que contemplem um tempo de reverberação adequado para que a transmissão de toda a informação seja eficiente.

Por isso, este trabalho tem por objetivo analisar o tempo de reverberação das salas do ISEP, comparando os valores ensaiados com os teóricos, observar a influência de variáveis cotidianas e sugerir possíveis melhorias para algumas salas. A fórmula utilizada foi a de Sabine, pois as salas se enquadrarem dentro de seus parâmetros de aplicação, e foram ensaiadas sete salas, sendo dois auditórios, uma sala de reuniões e quatro salas de aula, com o auxílio dos equipamentos Brüel & Kjaer. As variáveis analisadas foram as janelas, os estores, os *blackouts* e a presença de pessoas. Os resultados apresentados demonstram que a presença de pessoas é a variável que, dentro daquelas estudadas, mais diminui o tempo de reverberação e que nenhuma das salas abordadas se enquadram dentro da legislação estudada, sendo necessária a reforma das mesmas que pode contar com o uso de cadeiras de assento estofado e painéis perfurados.

Palavras-chave: Acústica; Fórmula de Sabine; Tempo de Reverberação; Absorção.

ABSTRACT

Over time, the demand on construction has been increasing in the economy, comfort, performance, among other aspects. Acoustics is inserted in this context as a necessity to be achieved by the constructions. This must comply with several parameters to be considered as satisfactory, being the reverberation time - object of study of this work - one of them.

The reverberation time is directly linked to the understanding of the words within a compartment, in other words, to the listeners understand the speaker clearly it is necessary an adequate reverberation time. The ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto - as an educational institution demands environments that contemplate a suitable reverberation time so that the transmission of all information is efficient.

Therefore, this paper has the objective of analyzing the reverberation time of the ISEP rooms, comparing the values tested with the theoreticians, observing the influence of daily variables and suggest possible improvements for these rooms. To perform this work was used Sabine's formula, since the rooms fit within their application parameters, and seven rooms were tested, being two auditoriums, a meeting room and four classrooms, with the help of Brüel & Kjaer equipment. The analyzed variables were the windows, the blinds, the blackouts and the presence of people. The results show that the presence of people is the variable that, among those studied, decreases the reverberation time. It was also noticed that none of the rooms comply with the legislation studied, being necessary the reform of them what can be done using upholstered seat chairs and perforated panels.

Keywords: Acoustics; Sabine's formula; Reverberation Time; Absorption.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me guiado durante toda essa trajetória e por ter dado forças para ultrapassar as dificuldades encontradas. Pela coragem e sabedoria concedidos nesta caminhada.

Ao Engenheiro Duarte Barroso Lopes pela orientação, paciência e atenção empregados. Em especial pelo auxílio nas horas mais importantes que foram de fundamental importância para a finalização deste trabalho. Também agradeço aos Engenheiros Jorge Moutinho, Manuel Barrote e Tiago Abreu e ao Vice-presidente José Barros de Oliveira pelo auxílio e disponibilidade oferecidos no decorrer deste trabalho.

Ao professor Gustavo Lacerda Dias e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Pato Branco*, por terem propiciado a oportunidade de fazer parte dessa experiência ímpar. Também aos meus pais, Antonio Hupalo e Marli Formighieri, que apesar da distância deram todo o suporte.

Meu muito obrigada às minhas amigas Maria Eugênia Pastorello e Thais Sila que deram um apoio inestimável, tiveram paciência e participaram ativamente durante essa jornada.

Por fim agradeço a todos que, de uma forma ou outra, fizeram parte desse período, mostrando o valor de se compartilhar os bons momentos.

ÍNDICE DE TEXTO

1	Introdução.....	1
2	Estado da Arte.....	5
2.1	Conceitos Acústicos	5
2.1.1	Som e Ruído.....	5
2.1.2	Características do Som	6
2.1.3	Fenômenos Ondulatórios	8
2.1.4	Nível Logarítmico.....	10
2.1.5	Nível Sonoro	10
2.1.6	Bandas de Frequência	11
2.1.7	Pressão Sonora	12
2.1.8	Intensidade Sonora.....	12
2.1.9	Potência Sonora.....	13
2.1.10	Campo Sonoro Difuso.....	14
2.1.11	Audição Humana e Poluição Sonora.....	14
2.1.12	Qualidade Acústica	15
2.2	Tempo de Reverberação.....	19
2.2.1	Métodos Numéricos	20
2.2.2	Ensaio.....	23
2.3	Absorção Sonora e Materiais Absorventes.....	26
2.3.1	Estruturas e Materiais Utilizados em Portugal.....	28
2.3.2	Estruturas e Materiais Utilizados no Brasil.....	37
2.4	Legislação.....	43

ÍNDICE DE TEXTO

2.4.1	Legislação Portuguesa	44
2.4.2	Legislação Brasileira	44
2.4.3	Outros Países	46
3	Caso de Estudo	49
3.1	Descrição das Salas	49
3.2	Metodologia	51
4	Resultados e Discussões	53
4.1.1	Salas	53
4.1.2	Análise Específica	61
4.1.3	Análise Geral	64
5	Considerações Finais	67
5.1	Desenvolvimentos Futuros	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de uma onda sonora.	5
Figura 2.2 – Comprimento de onda.	6
Figura 2.3 – Amplitude de uma onda.	7
Figura 2.4 – Classificação do som quanto à frequência.	8
Figura 2.5 – Reflexão de uma onda sonora.	9
Figura 2.6 – Refração de uma onda sonora.	9
Figura 2.7 – Curvas de ponderação.	11
Figura 2.8 – Bandas de frequência.	11
Figura 2.9 – Estrutura do ouvido humano.	15
Figura 2.10 – Elementos prejudiciais à propagação sonora.	17
Figura 2.11 – Placas refletoras.	18
Figura 2.12 – Difusor sonoro.	18
Figura 2.13 – Emissão de ondas com múltiplas reflexões.	19
Figura 2.14 – Variação típica do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes de som porosos e fibrosos segundo a frequência.	27
Figura 2.15 – Espuma acústica BASO PLAN.	28
Figura 2.16 – Painel de lã de rocha.	29
Figura 2.17 – Painel de lã de vidro.	31
Figura 2.18 – Celulose sendo projetada em parede.	32
Figura 2.19 – Placas de aglomerado de cortiça.	33
Figura 2.20 – Aglomerado de espuma de poliuretano.	34
Figura 2.21 – Painel acústico.	35

Figura 2.22 – Coeficientes de absorção do painel acústico.....	36
Figura 2.23 – Espumas absorvedoras.	38
Figura 2.24 – Lã de rocha.....	39
Figura 2.25 – Lã de vidro.	40
Figura 2.26 – Lã de pet.	41
Figura 2.27 – Painéis perfurados.	42
Figura 2.28 – Tempo ótimo de reverberação.....	45
Figura 3.1 – Planta do ISEP.	49
Figura 3.2 – Sonómetro Brüel & Kjaer.....	51
Figura 3.3 – Fonte sonora omnidirecional Brüel & Kjaer.	52
Figura 4.1 – Sugestões de melhoria para a sala C301.	56
Figura 4.2 – Grelha nos degraus das salas C301 e C302.....	57
Figura 4.3 – Sugestões de melhoria para sala J206.	59
Figura 4.4 – Solução de melhoria para Sala de Reuniões – CTC.....	61
Figura 4.5 – TR ₆₀ da sala C301.	62
Figura 4.6 – TR ₆₀ da sala C302.	63
Figura 4.7 – TR ₆₀ de todas as salas analisadas.....	65
Figura A – Planta de Revestimento do Auditório Magno sem escala.	75
Figura B – Planta de revestimentos do Auditório E sem escala.	76
Figura C – Planta de revestimentos da sala C301 sem escala.	77
Figura D – Planta de revestimentos da sala C302 sem escala.....	78
Figura E – Planta de revestimentos da sala I201 sem escala.	79
Figura F – Planta de revestimentos da sala J206 sem escala.	80
Figura G – Planta de Revestimento da Sala de Reuniões – CTC sem escala.....	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Velocidade do som em diferentes meios.	7
Tabela 2.2 – Posição da fonte sonora e do microfone.	25
Tabela 2.3 – Coeficiente de absorção sonora da espuma acústica BASO PLAN.	29
Tabela 2.4 – Coeficientes de absorção do painel de lã de rocha de 50 mm.	30
Tabela 2.5 – Coeficientes de absorção sonora do painel de fibra de vidro.	31
Tabela 2.6 – Coeficientes de absorção sonora de diversos materiais absorvedores sonoros.	32
Tabela 2.7 – Coeficientes de absorção sonora da placa de aglomerado de cortiça.	33
Tabela 2.8 – Coeficientes de absorção sonora de aglomerado de espuma de poliuretano.	34
Tabela 2.9 – Coeficientes de absorção sonora de diversos materiais e elementos.	36
Tabela 2.10 – Coeficientes de absorção sonora das espumas absorvedoras.	39
Tabela 2.11 – Coeficientes de absorção sonora da lã de rocha.	40
Tabela 2.12 – Coeficientes de absorção sonora da lã de vidro.	41
Tabela 2.13 – Coeficientes de absorção sonora de pessoas e mobiliário.	43
Tabela 2.14 – Resumo das legislações de alguns países.	48
Tabela 3.1 – Características das salas analisadas.	50
Tabela 4.1 – TR_{60} do Auditório A.	54
Tabela 4.2 – TR_{60} do Auditório E.	54
Tabela 4.3 – TR_{60} da sala C301.	55
Tabela 4.4 – Sugestões de melhoria para sala C301.	55
Tabela 4.5 – TR_{60} da sala C302.	57
Tabela 4.6 – TR_{60} da sala I201.	58
Tabela 4.7 – TR_{60} da sala J206.	58

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.8 – Sugestões de melhoria para sala J206.	59
Tabela 4.9 – TR ₆₀ da Sala de Reuniões – CTC.....	60
Tabela 4.10 – Sugestão de melhoria para Sala de Reuniões – CTC.....	60
Tabela 4.11 – Comparação entre TRs da C301 e C302.....	64
Tabela 4.12 – Comparação entre os TRs ensaiados e aqueles constados na legislação.....	66
Tabela A – TR teórico do Auditório Magno Anexo I Figura A.....	83
Tabela B – TR teórico do Auditório E Anexo I Figura B.	84
Tabela C – TR teórico da sala C301 Anexo I Figura C.	84
Tabela D – TR teórico da sala C302 Anexo I Figura D.....	85
Tabela E – TR teórico da sala I201 Anexo I Figura E.....	85
Tabela F – TR teórico da sala J206 Anexo I Figura F.....	86
Tabela G – TR teórico da sala de reuniões – CTC Anexo I Figura G.....	86

ABREVIATURAS

f	–	frequência [Hz]
λ	–	comprimento de onda [m]
ω	–	frequência angular da onda [Hz]
ρ	–	massa volúmica do material [kg/m ³]
v	–	velocidade de propagação das ondas no meio [m/s]
α	–	coeficiente de absorção sonora
$\bar{\alpha}$	–	coeficiente de absorção sonora médio
A	–	absorção sonora do material [m ²]
ABNT	–	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	–	<i>Articulation Index</i>
ANSI	–	<i>American National Standards Institute</i>
ASA	–	<i>Acoustical Society of America</i>
AVAC	–	aquecimento, ventilação e ar condicionado
BB	–	<i>Building Bulletin</i>
c	–	velocidade do som [m/s]
dB	–	decibel (unidade de medida)
dB	–	Documento Básico
dB(A)	–	decibel para a rede de ponderação A (unidade de medida)
DIN	–	legislação alemã
d_{\min}	–	distância mínima entre o microfone a fonte sonora [m]
EN	–	Norma Europeia

ABREVIATURAS

Hz	–	Hertz (unidade de medida)
I	–	intensidade sonora [W/m ²]
I ₀	–	intensidade sonora de referência [W/m ²]
IPP	–	Instituto Politécnico do Porto
ISEP	–	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	–	<i>International Organization for Standardization</i>
L	–	nível de pressão sonora [dB]
L _i	–	nível de intensidade sonora [dB]
L _p	–	nível de pressão sonora [dB]
L _w	–	nível de potência sonora [dB]
m ²	–	metro quadrado (unidade de medida)
m ³	–	metro cúbico (unidade de medida)
MRT	–	<i>Modified Rhyming Tests</i>
ms	–	milissegundo (unidade de medida)
NBN S	–	legislação francesa
NC	–	<i>Noise Criteria</i>
NP	–	Norma Portuguesa
NS	–	legislação Norueguesa
p	–	pressão sonora [Pa]
P	–	pressão sonora total em determinado ponto
P ₀	–	pressão sonora de referência [2x10 ⁻⁵ Pa]
Pa	–	Pascal (unidade de medida)
R	–	resistência térmica [m ² .K/W]
RASTI	–	<i>Rapid Speech Transmission Index</i>
RGR	–	Regulamento Geral do Ruído
RRAE	–	Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios
S	–	área da superfície do material em contacto com o ar [m ²]

s	– segundos (unidade de medida)
SI	– Sistema Internacional
SII	– <i>Speech Intelligibility Index</i>
SIL	– <i>Speech Interference Level</i>
$S_{m\acute{a}x}$	– amplitude de deslocamento das partículas [m]
SS	– norma Sueca
STI	– <i>Speech Transmission Index</i>
TR	– tempo de reverberação [s]
TR_{20}	– tempo de reverberação determinado por um decaimento de 20 dB [s]
TR_{30}	– tempo de reverberação determinado por um decaimento de 30 dB [s]
TR_{60}	– tempo de reverberação determinado por um decaimento de 60 dB [s]
TRM	– Tempo de reverberação médio [s]
TRs	– tempos de reverberação [s]
V	– volume do compartimento [m ³]
W	– potência sonora [W]
W_0	– potência sonora de referência [W]

1 INTRODUÇÃO

Com o decorrer do tempo, a exigência sobre a construção civil é maior, já que a tendência é de sempre melhorar o que já existe. Desta forma, as necessidades dos habitantes variam de acordo com a utilização da obra e estas devem ser atendidas com excelência ou, pelo menos, dentro da legislação vigente.

Um exemplo a ser citado são as instituições de ensino cujas salas de aula precisam de um bom desempenho acústico para que o som possa ser recebido da melhor maneira possível pelos alunos e para que não sofra interferência por ambientes externos à sala.

De acordo com Silva (2007), o ruído pode ter diversos impactos na saúde do ser humano, como:

- Afetação da audição;
- Perturbações fisiológicas diversas;
- Alteração do sono;
- Perturbação de várias atividades;
- Interferência na comunicação oral;
- Incomodidade.

São vários os parâmetros que avaliam a qualidade acústica de um compartimento, entres estes pode ser mencionado o tempo de reverberação, a clareza, a definição, a inteligibilidade, entre outros. Para este trabalho, optou-se por focar em um destes parâmetros, sendo o tempo de reverberação o escolhido.

A acústica, que é a ciência que estuda o som, abrange o conceito reverberação como sendo a permanência do som em um compartimento através das reflexões das superfícies. Sua medição é feita pelo tempo que o som leva para diminuir sua intensidade – tempo de reverberação – e é de fundamental importância para um bom desempenho acústico, que é determinado, além do tempo de reverberação, pelo isolamento tanto a sons aéreos quanto a sons de percussão (Donoso, 2017).

Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo responder a seguinte questão: qual é o tempo de reverberação das salas do Instituto Superior de Engenharia do Porto?

CAPÍTULO 1

Para se chegar ao objetivo deste estudo, pegou-se uma amostra de sete salas de aula do ISEP para as quais determinou-se o tempo de reverberação teórico, comparou-se com os resultados obtidos através de ensaios realizados “*in situ*”, confirmando a teoria, e com os valores que a legislação determina.

A dissertação está dividida em 5 capítulos. O primeiro aborda a introdução, objetivos e justificativa. Em seguida é apresentado o estado da arte, que envolve conceitos importantes ao leitor. Logo após há o estudo de caso em si, sendo apresentados, posteriormente, os resultados e discussões, finalizando com as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é analisar o tempo de reverberação das salas do ISEP.

- **Objetivos específicos**

São objetivos específicos deste trabalho:

- Estudar os materiais utilizados para melhoria acústica dos ambientes;
- Comparar a brasileira com outras legislações pertinentes;
- Determinar os valores teóricos dos tempos de reverberação das salas;
- Caracterizar o TR_{60} das salas através de ensaios;
- Comparar os valores encontrados.

Justificativa

O processo de aprendizagem é fundamental para o ser humano e parte desse processo se dá dentro das instituições de ensino, em salas de aula. Como a principal forma de transmissão de conhecimento é por via oral, a qualidade acústica destas salas é de fundamental importância. De acordo com Knecht et al (2002), a acústica das salas pode ser um agente dificultador na capacidade de ouvir e aprender dos estudantes.

O tempo de reverberação está diretamente associado ao entendimento das palavras, à sua inteligibilidade, por isso seu estudo é imprescindível para o estudo da acústica de um compartimento desse tipo de uso.

Como o assunto ainda não é amplamente difundido no Brasil, onde nem todos os profissionais possuem a capacidade de aplicá-lo, e cujas normas ainda estão caminhando para se chegar a um ideal, o estudo da acústica e do tempo de reverberação será valioso para uma maior aplicação no país, já que em Portugal é uma questão à qual os acadêmicos estão mais expostos.

A essência deste trabalho é mostrar como se dão os cálculos de tempos de reverberação teóricos, aplicados na fase de projeto, e como são obtidos os valores reais através de ensaios, empregados depois de a obra já estar construída.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 CONCEITOS ACÚSTICOS

A base da acústica é o som, portanto, a seguir serão apresentados alguns conceitos que irão servir de base para o entendimento do caso de estudo realizado neste trabalho.

2.1.1 Som e Ruído

Segundo Simões (2017), o som se dá pela alteração da pressão atmosférica que ocorre devido a uma vibração mecânica, sendo sua propagação dada por meio de ondas que são percebidas pelo sistema auditivo humano. Já o ruído é tido como sendo um som sem harmonia, algo indesejado (Bistafa, 2006). Posto isto, Souza, Almeida e Bragança (2012) complementam que, dentro de um ambiente interno, o ruído pode ser resultante de atividades tanto internas quanto externas à edificação e esse conjunto forma o chamado ruído de fundo.

Dois tipos de ruídos interessantes para a acústica de ambientes são o ruído branco e o ruído rosa. De acordo com a ISO 2240 (1973 apud Vieira, 1999), o ruído branco possui a mesma energia em todas as frequências (100 Hz a 10000 Hz), já o ruído rosa concentra energia no intervalo de frequências de 500 Hz a 2000 Hz.

A onda sonora é do tipo mecânica, ou seja, necessita de meio para se propagar. Se propaga em todas as direções (tridimensional) e é longitudinal – vibração e propagação paralelas – (Júnior, 2017). No caso da propagação no ar, pode-se observar como se dá a propagação das ondas sonoras na figura abaixo.



Figura 2.1 – Esquema de uma onda sonora.

Fonte: Júnior (2017).

Na Figura 2.1 é possível observar o comportamento das moléculas de ar quando submetidas à vibração. Há pontos de rarefação e de compressão das moléculas que fazem com que as partículas próximas se desloquem, compreendendo assim a onda sonora.

Para determinar essa pressão sonora, Patrício (2002) usa da seguinte expressão:

$$p(t) = P(t) - P_0 \quad (2.1)$$

onde:

$p(t)$ – pressão sonora;

$P(t)$ – pressão total resultante em um determinado ponto;

P_0 – pressão atmosférica.

2.1.2 Características do Som

Comprimento de Onda

Segundo Halliday et al(2009), o comprimento de onda (λ) é definido como a distância entre repetições de uma forma da onda, como mostra a figura abaixo.

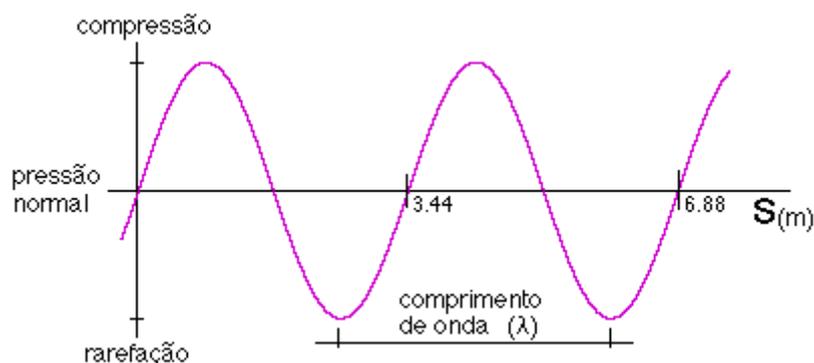


Figura 2.2 – Comprimento de onda.

Fonte: Iazzetta (2017).

A Figura 2.2 apresenta o comprimento de onda como sendo a distância entre dois vales de uma onda sonora que, neste caso, corresponde a dois instantes em que as moléculas de ar estão rarefeitas.

Amplitude

Como mostra a figura a seguir, a amplitude é o maior valor atingido pela onda em um período (inverso da frequência) e é traduzido como sendo o “volume” do som. A amplitude e a intensidade do som estão diretamente relacionadas (Amorim e Licarião, 2005).

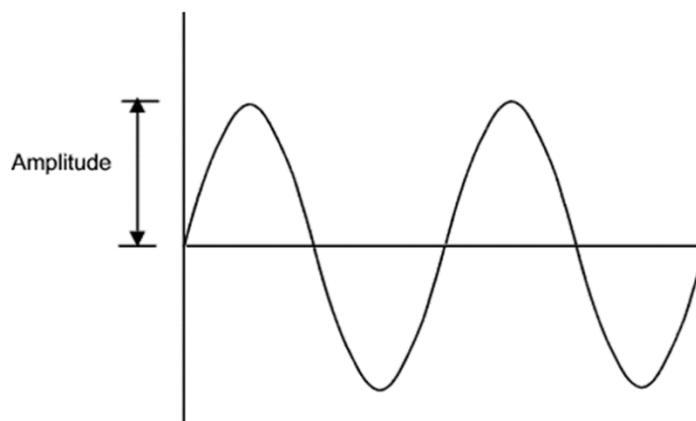


Figura 2.3 – Amplitude de uma onda.

Fonte: Reis (2017).

A Figura 2.3 ilustra a amplitude da onda como sendo o valor do eixo até a crista (o ponto mais alto) ou vale (o ponto mais baixo) da onda.

Duração

Conforme apresenta Prado (1990), a duração é o período de tempo em que o som é emitido.

Velocidade

A velocidade da onda em determinado meio depende das propriedades deste, sendo diretamente proporcional à rigidez do material (Simões, 2017). São mostrados alguns exemplos na figura a seguir.

Tabela 2.1 – Velocidade do som em diferentes meios.

Meio Material	Velocidade de Propagação (m/s)
Ar (T = 0°C)	331
Ar (T = 15°C)	340
Ar (T = 20°C)	343
Hélio	970
Água	1480
Alumínio	5100
Borracha	30-70

Fonte: Adaptado de Simões (2017, p. 14).

Pela Tabela 2.1 – Velocidade do som em diferentes meios. pode-se notar que, quanto maior a temperatura do ar, maior é a velocidade de propagação do som. Já nos outros meios, há uma grande diferenciação da velocidade entre os mesmos.

Frequência

Amorin e Licarião (2005) explicam que a frequência é dita como, durante 1 segundo, quantas vezes a molécula oscila, sendo sua unidade de medida o Hertz (Hz) ou ciclos por segundo. Alguns exemplos de frequências são mostrados na Figura 2.4.

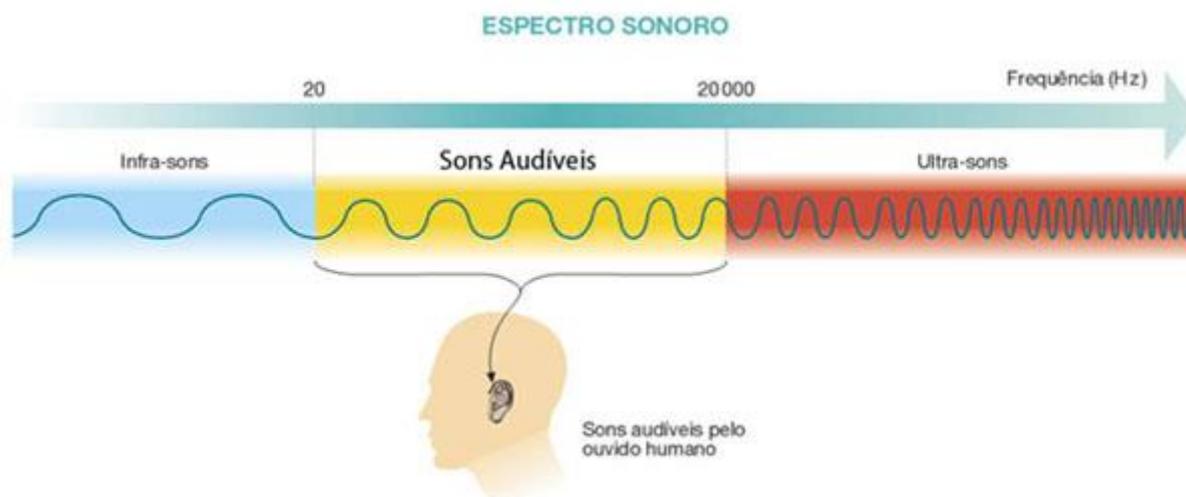


Figura 2.4 – Classificação do som quanto à frequência.

Fonte: Machado (2017).

A figura acima expõe que o ouvido humano capta frequências entre 20 Hz e 20000 Hz, sendo considerados infrassons as frequências menores que este intervalo, ultrassons as frequências até 10 GHz e híper-sons as frequências maiores que 10 GHz.

As frequências determinam o tom do som, ou seja, se ele é grave ou agudo. Frequências mais baixas resultam em sons mais graves, assim como sons mais agudos são consequência de frequências mais altas (Amorin e Licarião, 2005).

Timbre

O timbre é o que permite o ouvido distinguir dois sons com a mesma frequência, como seria o caso de um saxofone e um piano (SENAI, 2014).

2.1.3 Fenômenos Ondulatórios

Os efeitos que a onda sonora pode sofrer podem ser compreendidos em reflexão, refração, absorção, difração, superposição de ondas, interferências de ondas e ressonância, abordados na sequência (Cebola, 2017).

A reflexão de uma onda ocorre quando esta atinge um obstáculo e retorna com as mesmas características iniciais, como mostra a Figura 2.5. Este fenômeno pode ser dividido de duas formas: quando o retorno da

onda se dá após o som primário ter desaparecido (eco) e antes do som primário ter desaparecido (reverberação).

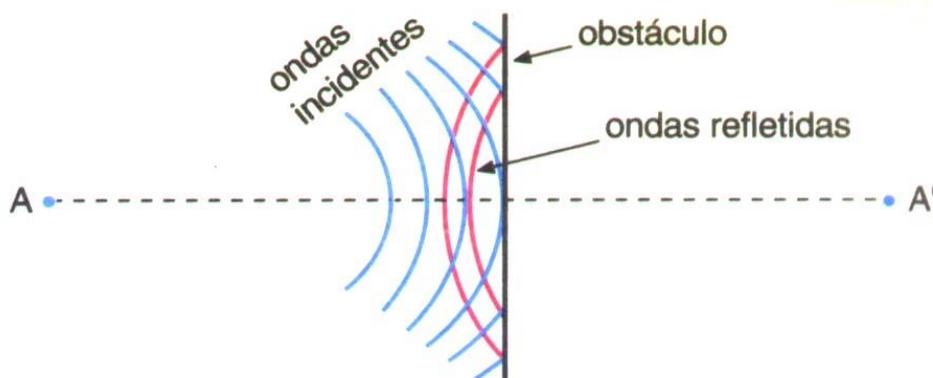


Figura 2.5 – Reflexão de uma onda sonora.

Fonte: UNIME (2017).

A Figura 2.5 ilustra o comportamento de uma onda sonora ao encontrar um obstáculo.

A refração se dá quando a onda muda o meio físico pelo qual está se propagando, isso resulta na alteração de algumas características, como sua velocidade e seu comprimento de onda, sendo que sua frequência não muda, como apresenta a figura abaixo.

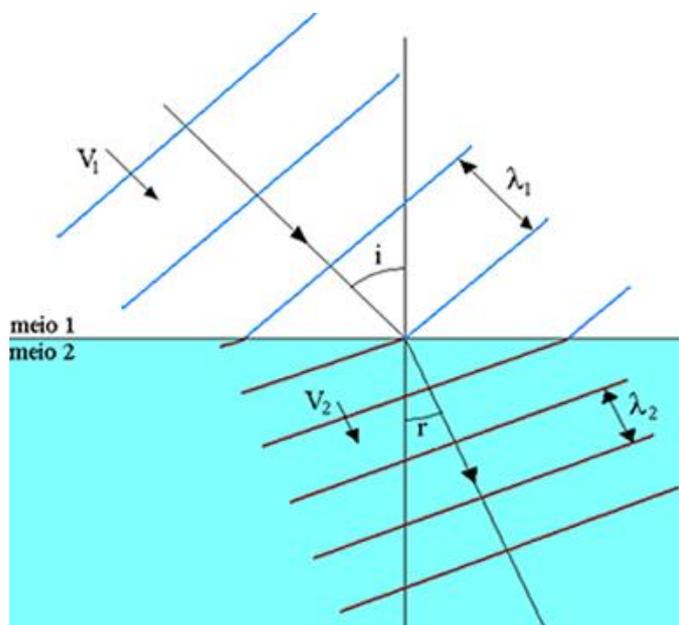


Figura 2.6 – Refração de uma onda sonora.

Fonte: Silva (2017).

A figura acima (Figura 2.6) representa a refração de uma onda sonora que se propaga no ar e passa a se propagar na água, mudando sua velocidade e seu comprimento de onda.

No caso da absorção, ocorre quando uma onda está se propagando por um meio material e uma parcela de sua energia é absorvida por esse meio, fazendo com que sua amplitude diminua.

Já a difração é a capacidade que uma onda tem de desviar de obstáculos.

As ondas sonoras também podem se superpor – quando duas ondas ou mais estão se propagando no mesmo meio ao mesmo tempo. Essa superposição gera uma interferência em tais ondas que pode ser construtiva, destrutiva ou destrutiva-completa.

Por fim, há o fenômeno da ressonância que acontece quando uma onda atinge um corpo e a frequência de vibração tanto da onda quanto do corpo são iguais. Isso faz com que o corpo vibre em amplitudes cada vez maiores, podendo resultar na ruptura de suas moléculas.

2.1.4 Nível Logarítmico

Como supracitado nas características do som, a percepção do volume de uma onda sonora está diretamente ligada à intensidade da mesma que decorre da pressão gerada no meio. Na faixa de pressão que o ser humano consegue distinguir, tem-se o limite da audibilidade e o limite da dor, como pode ser observado na Figura 2.4. Como essa fração é muito grande – para uma frequência de 1000 Hz, a variação vai de 10^{-12} watt/m² a 1 watt/m² – optou-se por utilizar-se de uma razão logarítmica, o decibel (dB). Essa razão pode ser resultado de duas potências ou duas intensidades que serão abordados em alguns níveis sonoros na sequência do trabalho (Iazzetta, 2007).

2.1.5 Nível Sonoro

Miyara (2017) explica que o nível logarítmico é uma medida conveniente, entretanto, não representa o som como ele é ouvido, já que isso depende de sua frequência. Por exemplo, 1 kHz e 0 dB é audível enquanto para se ouvir um som a 100 Hz é necessário chegar a 37 dB. Dessa forma, criou-se um sistema de filtragem para se adequar à realidade do ouvido humano, homogeneizando as frequências baixas e muito altas. Foram criadas três redes de ponderação de frequência que equivalem a, aproximadamente, 40 dB, 70 dB e 100 dB, nomeadas de A, B, e C, respectivamente, como mostra a imagem abaixo.

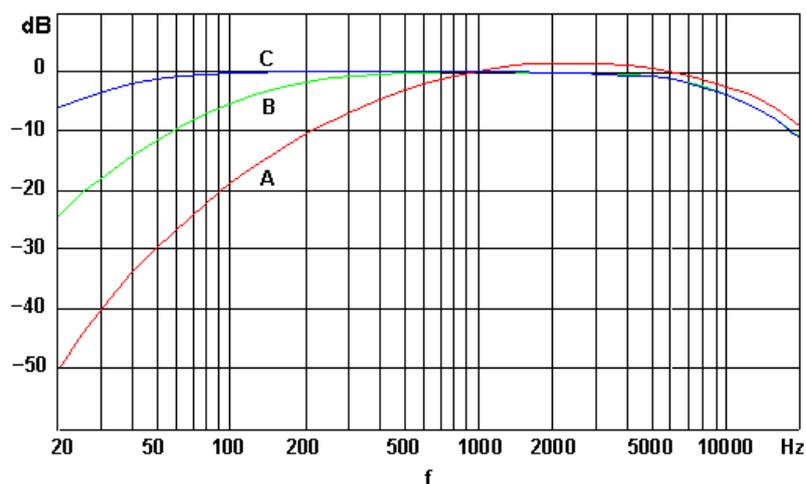


Figura 2.7 – Curvas de ponderação.

Fonte: Miyara (2017).

A Figura 2.7 mostra que a rede de ponderação A é utilizada em sons de nível baixo, a rede B é usada em sons de nível médio e a rede C para altos níveis. Sendo assim, essa medição de rede com a ponderação tida em decibéis é dita como dBA ou dB(A) (Miyara, 2017).

2.1.6 Bandas de Frequência

Como o ouvido humano não percebe as frequências de maneira linear, é utilizada uma relação de frequências. Quando essa relação de frequências for igual a 2, tem-se uma oitava de frequência. Sendo assim, as frequências audíveis pelo ser humano utilizadas na acústica são separadas por oitavas e por 1/3 de oitava – que é a faixa da oitava dividida em três partes – e são chamadas de bandas de frequência ou bandas de oitava, neste caso (UNESP, 2017).



Figura 2.8 – Bandas de frequência.

Fonte: UNESP (2017).

Pode-se observar na Figura 2.8 a divisão entre as frequências audíveis (20 Hz a 20000 Hz) em bandas de oitava e bandas de 1/3 de oitava, onde a descrição de cada banda é feita pelo seu valor central.

A UNESP (2017) ainda explica que o Sistema Internacional (SI) utiliza a frequência de referência como sendo 1000 Hz, ficando as bandas com a seguinte configuração:

- Baixas frequências: 31,25; 62,5; 125 e 250 Hz;
- Médias frequências: 500, 1000 e 2000 Hz;
- Altas frequências: 4000, 8000 e 16000 Hz.

2.1.7 Pressão Sonora

A pressão sonora é dita como sendo a variação média da pressão em relação à pressão atmosférica, de acordo com Iazzetta (2007). Dessa forma, o nível de pressão sonora é dado em relação à pressão limite de audibilidade $P_0 = 20 \text{ mPa}$ ($2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$) e é dado pela fórmula abaixo:

$$L_p = 20 \log \left(\frac{p_{eficaz}}{p_0} \right) \quad (2.2)$$

onde:

L_p – nível de pressão sonora (dB);

p_{eficaz} – pressão sonora em relação à pressão atmosférica (Pa ou N/m^2);

p_0 – pressão de referência (Pa ou N/m^2).

2.1.8 Intensidade Sonora

A intensidade sonora diz respeito à quantidade de energia que uma onda sonora carrega durante um determinado tempo e por uma determinada área, ou seja, é o fluxo de energia por área (UALG, 2017).

Sendo assim, pode ser expressa como:

$$I = \frac{1}{2} \rho (\omega \times s_{máx})^2 v \quad (2.3)$$

onde:

I – Intensidade sonora (W/m^2);

ρ – massa volúmica do material (kg/m^3);

ω – frequência angular da onda (Hz);

$s_{máx}$ – amplitude de deslocamento das partículas (m);

v – velocidade de propagação das ondas no meio (m/s).

e

$$\omega = 2\pi f \quad (2.4)$$

onde:

f – frequência (Hz);

lazzetta (2007) afirma que o nível de intensidade sonora é baseado na referência de $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ é dado pela seguinte expressão:

$$L_I = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (2.5)$$

onde:

L_I – nível de intensidade sonora (dB);

I – intensidade sonora (W/m^2);

I_0 – intensidade sonora de referência (W/m^2).

2.1.9 Potência Sonora

A potência sonora, segundo lazzetta (2010), é toda a energia acústica que uma fonte sonora libera por unidade de tempo, podendo ser medida em W ou J/s. Esta variável não depende do meio nem da posição da fonte.

O nível de potência sonora é um valor que se baseia na referência de $W_0 = 10^{-12}$ watts (W) e é determinado através da seguinte expressão:

$$L_w = 10 \log \left(\frac{W}{W_0} \right) \quad (2.6)$$

Onde:

L_w – nível de potência sonora (dB);

W – potência sonora (W);

W_0 – potência acústica de referência (W).

2.1.10 Campo Sonoro Difuso

Conforme explica Lopez e Gonzalez (1993), as vibrações de uma fonte sonora situada em um espaço ilimitado originam perturbações na atmosfera próxima, que sob a forma de variações de pressão se propagam em todas as direções a partir da fonte sonora, criando um campo acústico ao redor da mesma, que pode ser estudado a partir das leis que relacionam a pressão sonora com o tempo e a distância.

Os autores também fundamentam que para ser possível realizar análises estatísticas nesse campo, é necessária uma idealização deste campo considerando as seguintes premissas:

- As ondas refletidas chegam a todos os pontos do interior do recinto a partir de diferentes direções, sendo todas as direções igualmente prováveis;
- A energia sonora de um ponto do recinto é obtida somando aritmeticamente os valores médios das energias de todas as ondas refletidas que passa por esse ponto;
- A densidade de energia sonora, em um dado instante de tempo, é a mesma em qualquer ponto do recinto.

Dessa forma, um campo sonoro que atenda a essas proposições é considerado um campo sonoro difuso.

2.1.11 Audição Humana e Poluição Sonora

A Acústica Médica (2017) explica que o ouvido humano é composto pelos ouvidos externo, médio e interno, conforme apresentado na Figura 2.9, sendo que suas funções consistem em:

- Ouvido externo: capta as ondas sonoras e as direciona até o tímpano por meio do canal auditivo;
- Ouvido médio: é composto pelo tímpano e por três pequenos ossos – martelo, bigorna e estribo – cuja função é amplificar e transmitir o som;
- Ouvido interno: local onde o som torna-se impulsos elétricos pela cóclea, que possui células sensoriais e fluido, responsável por enviar a mensagem através de fibras até o cérebro, que a interpreta.



Figura 2.9 – Estrutura do ouvido humano.

Fonte: Acústica Médica (2017).

É possível observar as três partes do ouvido e seus constituintes através da Figura 2.9.

O ouvido humano pode captar sons a partir de 10 dB ou 15 dB, em um grau normal, podendo atingir até os 80 dB ou 90 dB sem afetar a audição. Entretanto, valores acima destes podem causar diminuição audição, insônia, irritabilidade e dores de cabeça e são denominados como poluição sonora (Só Biologia, 2017).

2.1.12 Qualidade Acústica

Existem vários fatores que podem interferir na qualidade acústica de um compartimento, dentre eles pode ser citado o tempo de reverberação, inteligibilidade, definição, clareza, ruído de fundo, relação sinal/ruído, tempo de decaimento inicial, impressão espacial, sonoridade, geometria e reflexões úteis.

A definição de um compartimento é a relação entre a energia sonora recebida num dado intervalo de tempo e a energia total.

A clareza é definida como sendo a relação entre a energia sonora que chega ao auditor nos primeiros 80 ms e a energia que é percebida por ele após esse período de tempo. É de maior importância para ambientes em que ocorram espetáculos musicais ou que tenham emissão de palavra.

Já a inteligibilidade (*Speech Transmission Index* - STI) implica no discernimento da palavra e pode ser dita como sendo a relação percentual entre as consoantes recebidas e as consoantes emitidas, sendo adequada quando for maior do que 60%. Existem vários métodos para se determinar a inteligibilidade, entre eles podem ser citados AI, SII, SIL, RASTI, MRT.

Para o *Articulation Index* (AI), a inteligibilidade é dada em função da diferença entre o nível de ruído de fundo e o nível de sinal para períodos longos, somados a 12 dB relativos à voz, ou seja, é uma relação sinal/ruído que varia de 0 a 1 (Cysne, 2016).

De acordo com ANSI (2017), o *Speech Intelligibility Index* (SII) é medido de 0 a 1 e é perturbado devido aos ruídos de fundo, filtragem e reverberação no compartimento em questão. Sua definição é dada como função do produto da banda de importância e da audibilidade da banda, somado ao número total de bandas de frequências. Podendo, ainda, ser calculado por meio de quatro métodos distintos: banda de frequência crítica, banda de frequência de um terço de oitava, banda fundamental de igual contribuição e banda de frequência de oitava.

Já o *Speech Interference Level* (SIL) não é indicado para locais onde hajam fatores que distorçam o som, como um grande tempo de reverberação, e é baseado na média dos níveis de pressão sonora para determinadas bandas de frequências, pois, dependendo da distância do locutor, é possível saber o esforço – em dB – que este necessita para se fazer audível, variando de homem para mulher (Silva, 2013).

O *Speech Transmission Index* (STI) avalia a mudança na profundidade de modulação do som que se origina da reverberação e do ruído de fundo, já que quanto menor for a modulação em amplitude mais inteligível é o som. Este método pode ser simplificado e é chamado de *Rapid Speech Transmission Index* (RASTI), que tem o mesmo princípio do STI, entretanto, avalia um número menor de frequências (Patrício, 2008).

Conforme Cysne (2016), para a aplicação do *Modified Rhyming Tests* (MRT), há a elaboração de textos baseados em rimas modificadas que são avaliados através de múltipla escolha por ouvintes em sua língua nativa. Entretanto, este método pode variar de acordo com o locutor e os ouvintes, o que não confere vantagem ao mesmo.

Outro fator que afeta a qualidade acústica de um local é o ruído de fundo. No caso de uma sala de aula, aquilo que não for a voz do professor é considerado ruído de fundo. Como será visto mais à frente, existem normas que limitam o nível de pressão sonora e tempos de reverberação em diversos locais a fim de preservar a saúde humana. O ruído de fundo contribui para o aumento da pressão sonora e para a diminuição da inteligibilidade do som. Algumas de suas causas podem ser o sistema de aquecimento, ventilação e ar-condicionado, o ruído externo de vias de tráfego, entre outros. Os valores de ruído de fundo são, geralmente, determinados em função das curvas NC (*Noise Criteria*) que variam de acordo com a utilização do ambiente e são encontrados em legislações e referências bibliográficas (Cysne, 2016).

Carvalho (2003 apud Costa, 2014) afirma que a relação sinal/ruído é a diferença entre a fonte sonora desejável e o ruído de fundo, influenciando diretamente na inteligibilidade. Nelson, Soli e Seltz (2002) também coloca que o valor ideal para essa relação é de +15 dB para salas de aula.

Ainda conforme Carvalho (2003 apud Costa, 2014), o tempo de decaimento inicial (TDI) é semelhante ao tempo de reverberação, entretanto, este mede o decaimento apenas dos 10 primeiros decibéis. Dessa forma, para comparar o TDI com o TR, é necessário multiplicar o primeiro por 6. Este parâmetro é diferente do TR pois é mais sensível à geometria do ambiente, dependendo, portanto, da geometria da sala e da absorção acústica do ambiente, assim como o TR.

A impressão espacial, de amplitude, é dita por Vörländer (2008) como a relação entre a energia sonora recebida lateralmente e a energia sonora total, sendo também chamada de eficiência lateral (LF). Já a sonoridade (G) indica a amplificação que o som tem por conta da sala, definido como a diferença entre o nível de pressão sonora de uma fonte em um compartimento e em um campo aberto, medido a uma distância de 10 m – valor de referência – (Vörländer, 2008 apud Bastos, 2010).

No que diz respeito à geometria, esta deve ser levada em conta a fim de otimizar as reflexões existentes no ambiente, pois além das reflexões indesejadas, existem reflexões necessárias para otimizar a emissão e a recepção do som, sendo favorável tanto para o locutor quanto para os ouvintes (Carvalho, 2003 apud Costa, 2014). Dessa forma, é necessário tomar cuidado com elementos estruturais, forros e absorvedores que dificultem a chegada do som aos ouvintes, como, por exemplo, a figura abaixo:

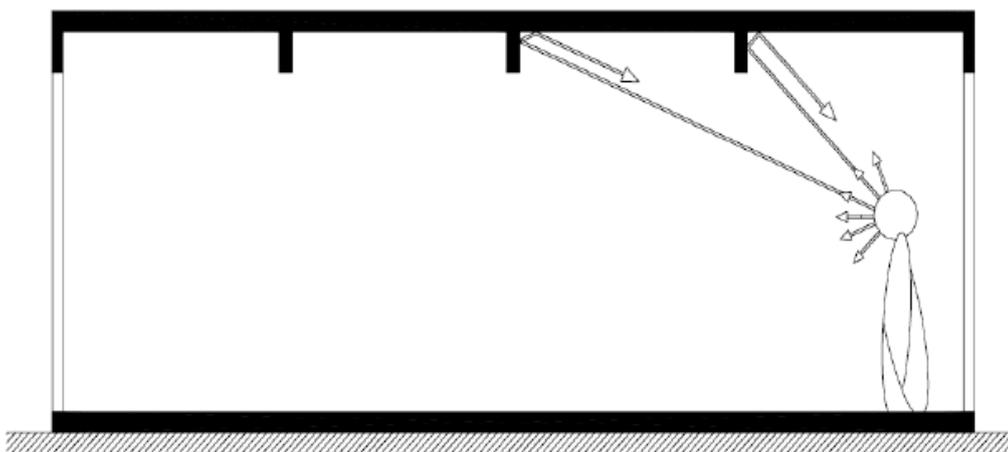


Figura 2.10 – Elementos prejudiciais à propagação sonora.

Fonte: Costa (2014, p. 53).

A Figura 2.10 mostra como as ondas sonoras são refletidas antes de chegar aos ouvintes, prejudicando a recepção correta das palavras.

As reflexões indesejadas podem ser resolvidas pela utilização de materiais absorventes, já as reflexões desejadas, além da geometria do ambiente, podem ser otimizadas ao utilizar difusores/painéis difusores que refletem a energia sonora uniformemente pelo espaço, conforme a ilustração na sequência (Patrício, 2008).

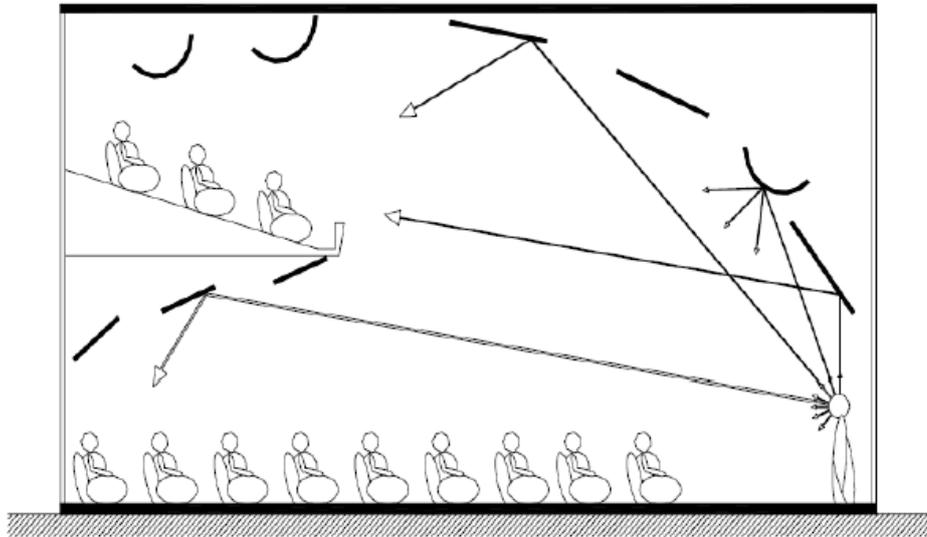


Figura 2.11 – Placas refletoras.

Fonte: Costa (2014, p. 54).

Pode ser observado na Figura 2.11 que as placas auxiliam as ondas sonoras a chegarem a todos os ouvintes do auditório, contribuindo para a homogeneidade da percepção das palavras.

Também podem ser empregadas placas refletoras que direcionam o som de forma conveniente, conforme apresentado na figura abaixo (Carvalho, 2003 apud Costa, 2014).



Figura 2.12 – Difusor sonoro.

Fonte: Acústica Brasília (2017).

A Figura 2.12 mostra como pode ser um difusor sonoro, que, pelas irregularidades apresentadas, refletem o som em várias direções.

Sendo assim, conforme Carvalho (2003 apud Costa, 2014), para uma sala de aula ideal é necessário ter materiais absorventes nas paredes – para diminuir o tempo de reverberação e o eco. Também é importante não colocar revestimento na parte central do teto (para que haja uma reflexão adequada do som), ter as placas refletoras posicionadas no perímetro do teto, utilizar janelas com vidros duplos e portas maciças vedadas, além de localizar as portas de outras salas de maneira adjacente para melhorar a dissipação do som.

2.2 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

Levando em conta um recinto fechado e uma determinada banda de frequência, o tempo de reverberação pode ser definido como:

[...] o intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora dessa banda de frequência, após ter sido interrompida a emissão de energia sonora, decresça em 60 dB, ou, de um ponto de vista energético, ao tempo que é necessário decorrer para que a densidade média da energia sonora atinja um milionésimo do seu valor inicial (Patrício, 2002, p. 7).

Deste modo, de acordo com o autor, o tempo de reverberação depende da frequência, da absorção sonora dos materiais constituintes do recinto e dos objetos presentes no mesmo.

Na figura abaixo é possível observar um esquema de como funciona a reflexão do som em uma sala.

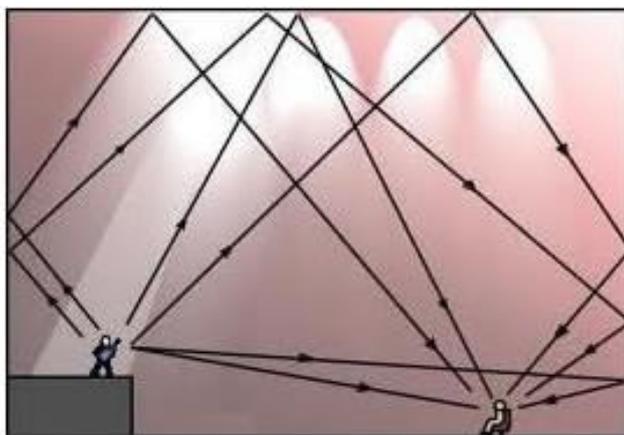


Figura 2.13 – Emissão de ondas com múltiplas reflexões.

Fonte: Anjos (2017).

Pode-se observar na Figura 2.13 que além do som direto entre o emissor e o receptor, este último recebe várias ondas refletidas pelas superfícies presentes no compartimento em questão, ressaltando a intervenção da absorção sonora no tempo de reverberação.

Silva (2013) verifica que salas com tempos de reverberação mais baixos ou próximos a zero implicam na melhoria da inteligibilidade da palavra. O autor recomenda um TR mínimo de 0,3 s, pois TRs muito baixos

podem provocar sonolência, e um máximo de 0,5 s para salas de aula do ensino primário e 0,7 s para os demais ensinos.

Existem diversos métodos matemáticos para se chegar ao valor do tempo de reverberação em um compartimento. A seguir serão apresentados alguns deles, em seguida será descrito como devem ser os ensaios para se verificar o tempo de reverberação.

2.2.1 Métodos Numéricos

Fórmula de Sabine

Desenvolvida por Wallace Clement Sabine em 1896, esta fórmula é mais comum para a estimativa do tempo de reverberação de um compartimento. Bistafa (2006) explica que esta é uma relação entre reverberação e absorção sonora. Patrício (2008) acrescenta que é baseada no coeficiente de absorção médio do compartimento e se dá pela seguinte expressão:

$$TR = 0,161 \frac{V}{A_{recinto}} \quad (2.7)$$

onde:

TR – tempo de reverberação (s);

V – volume do compartimento (m³);

A_{recinto} – absorção sonora do recinto (m²);

sendo:

$$A_{recinto} = \sum_{n=1}^N \alpha_n \times S_n \quad (2.8)$$

onde:

α_n – coeficiente de absorção sonora da *n*ésima superfície;

S_n – área da *n*ésima superfície (m²).

Entretanto, a fórmula de Sabine não é válida quando há superfícies muito mais absorventes que outras, da ordem de $\Delta\alpha_n > 0,4$. Isso porque o campo deixa de ser considerado difuso (Patrício, 2008). Kim (2010) complementa que a fórmula pode ser usada quando os coeficientes de absorção são pequenos.

Fórmula de Eyring

Esta fórmula pode ser utilizada quando o coeficiente de absorção é significativamente grande. A fórmula de Sabine é a mesma aproximação da fórmula de Eyring quando o coeficiente de absorção é considerado pequeno (Kim, 2010).

Esta fórmula é utilizada quando o coeficiente médio de absorção for maior do que 0,3 e quando for necessária uma maior precisão na estimativa (Bertoli; Destri; Gelain, 2012). Também despreza a absorção de energia sonora feita pelo ar, tolerável em condições normais de humidade relativa, e é expressa pela fórmula a seguir (Silva, 2003):

$$TR = -0,161 \frac{V}{S \times \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (2.9)$$

onde:

V – volume do compartimento (m^3);

S – área da superfície (m^2);

$\bar{\alpha}$ – coeficiente de absorção sonora médio das superfícies.

Esta solução considera que a energia do campo sonora é reduzida $(1 - \bar{\alpha})$ vezes a cada reflexão, o que acontece se depois de cada reflexão as ondas divergissem perfeitamente dentro de um campo uniforme. Isso não aconteceria caso as superfícies que refletissem as ondas fossem grandes o suficiente para direcionalizá-las, sendo que cada superfície absorveria uma quantidade diferente de energia (Silva, 2003).

Fórmula de Millington

Considerando a limitação mencionada na fórmula de Eyring, Millington chegou-se a uma outra fórmula para o cálculo do tempo de reverberação, conforme pode ser observado na equação abaixo (Silva, 2003):

$$TR = -0,161 \frac{V}{\sum_n S_n \times \ln(1 - \alpha_n)} \quad (2.10)$$

onde:

V – volume do compartimento (m^3);

S_n – área da n ésima superfície (m^2);

α_n – coeficiente de absorção sonora da n ésima superfície.

Esta equação é apropriada quando a absorção não ocorre de forma uniforme no espaço. Entretanto, mesmo se uma pequena área de uma superfície tiver um coeficiente de absorção igual a um, haverá um erro de cálculo onde o tempo de reverberação será igual a zero (Kim, 2010).

Outras Fórmulas

Além das principais equações apresentadas anteriormente, também existem as fórmulas de Fitzroy e de Kuttruff.

De acordo com Fitzroy (1959 apud Mannis, 2008), sua fórmula é utilizada quando se possui uma absorção uniforme no compartimento e é determinada a partir da seguinte expressão:

$$TR = \frac{1,161V}{S^2} \left(\frac{S_x}{-\ln(1-\bar{\alpha}_x)} + \frac{S_y}{-\ln(1-\bar{\alpha}_y)} + \frac{S_z}{-\ln(1-\bar{\alpha}_z)} \right) \quad (2.11)$$

onde:

V – volume do compartimento (m³);

S – área total da superfície do compartimento (m²);

S_x – área da superfície das paredes laterais (m²);

S_y – área da superfície das paredes posterior e anterior (m²);

S_z – área da superfície do piso e do teto (m²);

$\bar{\alpha}_x$ – absorção média das paredes laterais;

$\bar{\alpha}_y$ – absorção média das paredes posterior e anterior;

$\bar{\alpha}_z$ – absorção média do piso e do teto.

Como as superfícies são consideradas em apenas três direções, não reflete as alterações sutis nos coeficientes de absorção das mesmas. Por isso é utilizada para espaços relativamente grandes (Kim, 2010).

Já Kuttruff (2009) expõe sua fórmula como segue abaixo:

$$TR = - 0,161 \frac{V}{S \times \ln(1-\bar{\alpha}) \times \left[1 + \frac{\gamma^2}{2} \ln(1-\bar{\alpha}) \right]} \quad (2.12)$$

onde:

V – volume do compartimento (m^3);

S – área total da superfície do compartimento (m^2);

$\bar{\alpha}$ – coeficiente de absorção sonora médio das superfícies;

γ^2 – coeficiente relativo ao comprimento dos percursos percorridos pelas ondas sonoras.

Existem ainda outras fórmulas para situações específicas que foram baseadas nas expressões apresentadas anteriormente, mas que não serão abordadas por este trabalho.

2.2.2 Ensaios

Os ensaios para determinar os tempos de reverberação são baseados na NP EN 3382-2:2011, cujos principais pontos são descritos a seguir.

Equipamentos

Para executar o ensaio a fim de determinar o tempo de reverberação de um compartimento, são necessários os seguintes equipamentos:

- Tripé;
- Microfone;
- Filtros;
- Calibrador;
- Fonte sonora omnidirecional;

Calibração dos Equipamentos

A calibração dos instrumentos deve ser feita antes e depois de cada grupo de medições (Brüel & Kjaer, 1994). Dessa regulação, a diferença de valores não pode ser maior do que 0,5 dB, caso contrário, as medições devem ser refeitas (Antunes, 2013).

Métodos de Ensaio

Existem dois métodos para se chegar ao tempo de reverberação de um compartimento, o Método do ruído interrompido e o Método da resposta impulsiva integrada, ambos contidos na NP EN ISO 3382-2:2011.

No primeiro, pode-se utilizar uma fonte sonora aleatória ou pseudo-aleatória, esta última devendo ter interrupções aleatórias. O nível de pressão produzido pela fonte sonora deve fazer com que o decaimento

se inicie 35 dB acima do ruído de fundo na frequência correspondente. Caso seja definido o TR_{30} , esse valor precisa ser de 45 dB acima do ruído de fundo. Para o caso das frequências, pode-se optar por utilizar de um ruído rosa no campo reverberante da sala, de 88 Hz até 5657 Hz, o que resulta nas bandas de terço de oitava abrangendo as frequências de 100 Hz a 5000 Hz e as bandas de oitava de 125 Hz a 4000 Hz. Quando utilizados os métodos de engenharia e de precisão, o tempo deve ser suficiente para que o campo sonoro se torne estacionário antes da fonte ser desligada.

A média das medições pode ser feita de duas formas: utilizando o valor médio dos tempos de reverberação para cada medição individual ou pelo método preferencial, que consiste em fazer a média de todos os decaimentos do quadrado da pressão e calcular o TR com base na curva resultante. No segundo método, as curvas são colocadas umas sobre as outras, tendo seus inícios coincidentes e tendo a pressão sonora de emissão mantida constante. Em seguida, os valores de cada curva do quadrado da pressão sonora são acrescidos em cada incremento do tempo de decaimento, e todos esses acréscimos são tidos como um decaimento único, onde o TR é encontrado.

Já para o Método da resposta impulsiva, a fonte pode ser obtida a partir de várias maneiras como, por exemplo, estouros, tiros, entre outros. Esta não deve ser ela mesma reverberante, deve ter um espectro adequado e emitir um nível de pressão sonora de pico de tal forma que a curva de decaimento comece, no mínimo, 35 dB acima do nível do ruído de fundo da banda de frequência em questão.

Para se gerar o TR, são utilizadas as curvas de decaimento de cada banda de oitava pela integração inversa no tempo do quadrado da resposta impulsiva filtrada.

Método de Controle

É indicado para avaliar o coeficiente de absorção sonora em um compartimento a fim de examinar o ruído e o isolamento a sons aéreos e de percussão. Apenas as bandas de oitava são utilizadas nas medições, tendo exatidão nominal maior do que 10% para tais bandas. Este método demanda de, ao menos, uma posição de fonte sonora e da média dos resultados de, pelo menos, duas combinações de fonte sonora – microfone.

Método de Engenharia

É o método utilizado para aferir o desempenho de edifícios perante comparação a orientações de TR ou de absorção sonora do compartimento. Sua exatidão nominal é dita como sendo maior do que 5% para bandas de oitava e 10% para bandas de terço de oitava. Necessita de, no mínimo, duas posições de fonte sonora e seis combinações independentes de fonte sonora – microfone.

Método de Precisão

Este método é adequado quando é necessária uma grande precisão nos resultados. Sua exatidão é superior a 2,5% para bandas de oitava e 5% para bandas de terço de oitava. Requer, pelo menos, duas posições de fonte sonora e 12 combinações independentes de fonte sonora – microfone.

Quando não há condições específicas na gama de frequências, para o método de controlo, a faixa varia de 250 Hz a 2000 Hz. Já para o método de engenharia e o de precisão, essa gama vai dos 125 Hz aos 4000 Hz para bandas de oitava e dos 100 Hz aos 5000 Hz para as bandas de um terço de oitava.

Posição do Microfone

De acordo com o Método da Engenharia, o número mínimo de posições da fonte sonora e do microfone para ambos os métodos é dado pela tabela abaixo:

Tabela 2.2 – Posição da fonte sonora e do microfone.

Elemento	Engenharia
Combinação fonte sonora - microfone	6
Posição da fonte sonora	≥ 2
Posição do microfone	≥ 2
Nº de decaimentos em cada posição	2

Fonte: Adaptado de NP EN ISO 3382-2 (2011, p. 12).

Na Tabela 2.2, a combinação entre posições da fonte sonora e do microfone deve ser de seis vezes, sendo que o local da fonte sonora e do microfone deve ser alterado, pelo menos, duas vezes.

Considera-se que, quando os resultados obtidos são usados como termo de correção de outras medições, é preciso apenas de uma posição de fonte e de três posições de microfone.

A fonte sonora deve ocupar locais comuns de utilização da sala. Para o caso de ambientes muito pequenos, um dos locais deve ser situado no canto da sala. A distância entre as posições do microfone deve ser de, pelo menos, 2 m para as frequências comuns e deve distar 1 m, no mínimo, de superfícies refletoras, incluindo o piso. Não são assentidos arranjos geométricos.

O microfone precisa estar afastado a uma distância mínima da fonte sonora para evitar a interferência do som direto e deve obedecer a seguinte equação:

$$d_{\min} = 2 \times \sqrt{\frac{V}{c \times TR}} \quad (2.13)$$

onde:

V – volume do compartimento (m³);

C – velocidade do som (m/s);

TR – tempo de reverberação estimado (s).

Média Espacial

A média espacial pode ser dada para áreas separadas ou para um compartimento como um todo. Esta média pode ser obtida fazendo-se a média aritmética dos TRs obtidos para todas as posições de fonte e microfone separadas ou pela média do grupo de curvas de decaimento.

2.3 ABSORÇÃO SONORA E MATERIAIS ABSORVENTES

López (1999) afirma que, para que a superfície de um material absorva energia sonora, é necessário que a superfície seja relativamente transparente ao som – superfície exposta a um material altamente poroso ou lâmina perfurada usada como revestimento de um material poroso, entre outros – e que o meio possa transformar parte da energia de vibração da onda em atrito.

O autor Bistafa (2006) afirma que, ao incidir sobre uma superfície, parte da energia sonora é refletida por esta superfície e parte perde-se atrás desta, podendo ser absorvida pela mesma ou transmitida. A capacidade que uma superfície possui de absorver o som, ou a energia sonora, é chamada de coeficiente de absorção sonora (α) e é dada pela seguinte fórmula:

$$\alpha = \frac{I_{\text{absorvida}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{incidente}} - I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} = 1 - \frac{I_{\text{refletida}}}{I_{\text{incidente}}} \tag{2.14}$$

onde:

$I_{\text{absorvida}}$ – intensidade sonora absorvida;

$I_{\text{refletida}}$ – intensidade sonora do som refletido;

$I_{\text{incidente}}$ – intensidade sonora do som incidente.

Uma parte da energia sonora também é convertida em calor ao se propagar pelo ar. A absorção clássica é devida à viscosidade e condutividade térmica do ar, entretanto, ambas são despercebidas quando comparadas à absorção molecular. A presença de vapor de água no ar facilita a excitação pela onda sonora das moléculas de oxigênio e nitrogênio pelas das vibrações ressonantes. A quantidade de energia transferida por este mecanismo depende fundamentalmente da frequência, da humidade relativa do ar e, em menor grau, da temperatura. Contudo, essa absorção normalmente só é importante para

frequências altas e quando se consideram grandes distâncias (López, 1999). A NP EN ISO 3382-2 (2011) coloca que a absorção sonora do ar pode ser desconsiderada quando o TR for menor do que 1,5 s para a frequência de 200 Hz e abaixo de 0,8 s para a frequência de 4000 Hz, sendo assim, não há a necessidade de coletar os dados de temperatura e umidade relativa do ar.

Zannin et al (2005) diz que é possível desconsiderar a absorção sonora do ar para compartimentos com volumes da ordem dos 400 m³. Já os autores Fasold e Veres (2003 apud Zannin et al, 2005) afirmam que absorção sonora do ar faz diferença em volumes iguais ou maiores do que 1000 m³, principalmente para altas frequências.

Se tratando de materiais absorventes, o coeficiente de absorção sonora, para materiais porosos e fibrosos, depende da frequência do som, como pode ser observado na figura abaixo (Bistafa, 2006):

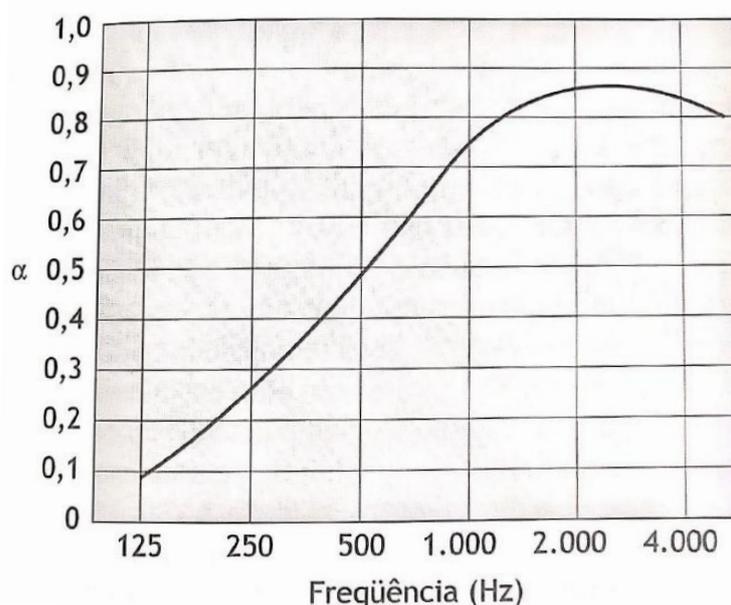


Figura 2.14 – Variação típica do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes de som porosos e fibrosos segundo a frequência.

Fonte: Bies e Hansen (1996, p. 233 apud Bistafa, 2006).

Rocha (2014) conclui em seu estudo que o isolamento sonoro entre espaços é influenciado pelas condições do campo sonoro emissor. A autora verificou que variações de -20% e +20% na absorção sonora do compartimento emissor resultaram em um aumento e uma diminuição, respectivamente, no índice de isolamento sonoro.

Conforme a Michalski (2017), os materiais absorventes podem ser classificados da seguinte forma:

Materiais Porosos

CAPÍTULO 2

Partem do princípio de que parte da energia que entra pelos poros do material é dissipada devido às múltiplas reflexões e ao atrito entre o ar presente dentro dos poros e o próprio material. Estes materiais são representados pelas espumas.

Materiais Fibrosos

São representados pelas lãs e absorvem o som pois a energia que entra no material através das fibras faz as mesmas vibrarem, gerando atrito entre elas que ocasiona a perda de energia.

Painéis Flexíveis

Consiste em uma superfície sobre a outra, tendo um espaço de ar entre elas. São mais utilizados para a absorção de sons de baixas e médias frequências ou, ainda, para uma frequência específica.

Ressonadores

A utilização desses ressoadores acontece pela mesma finalidade dos painéis flexíveis, entretanto, seu funcionamento é diferente. São cavidades que contém ar preso e estão interligadas ao ambiente por uma pequena abertura.

Painéis Perfurados

Possuem o mesmo princípio dos painéis flexíveis, com a diferença do painel, que é perfurado.

2.3.1 Estruturas e Materiais Utilizados em Portugal

Aqui será explanado acerca dos principais materiais que tem uma absorção acústica importante e que são empregados em Portugal.

Espumas Acústicas

Essas espumas possuem diversos acabamentos e cores, sendo todas anti-fogo. Como exemplo tem-se a BASO PLAN, uma espuma acústica lisa que pode ser observada na Figura 2.15.



Figura 2.15 – Espuma acústica BASO PLAN.

Fonte: Som e Acústica (2017).

O site apresenta algumas características desse material, como:

Composição: poliuretano

Espessuras: 30/50/70 e 100 mm

Tamanho: 1 X 0,5 m

Classe anti-fogo: Classe europeia DIN 4102 BI

Seu coeficiente de absorção pode ser analisado na tabela abaixo:

Tabela 2.3 – Coeficiente de absorção sonora da espuma acústica BASO PLAN.

Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
Espessura (mm)	30	0,14	0,30	0,66	0,96	0,98	0,89
	50	0,22	0,55	1,03	1,12	1,10	1,11
	70	0,26	0,87	1,17	1,01	1,00	1,01
	100	0,48	1,20	1,20	1,07	1,00	0,96

Fonte: Adaptado de Som e Acústica (2017).

A Tabela 2.3 mostra que a absorção do som é melhor nas altas frequências, entretanto, a diferença de espessura das placas não tem uma influência muito grande quando se trata dessa faixa de frequências, sendo mais notável nas frequências mais baixas.

Lã de Rocha

Os painéis de lã de rocha podem ser observados na figura abaixo:

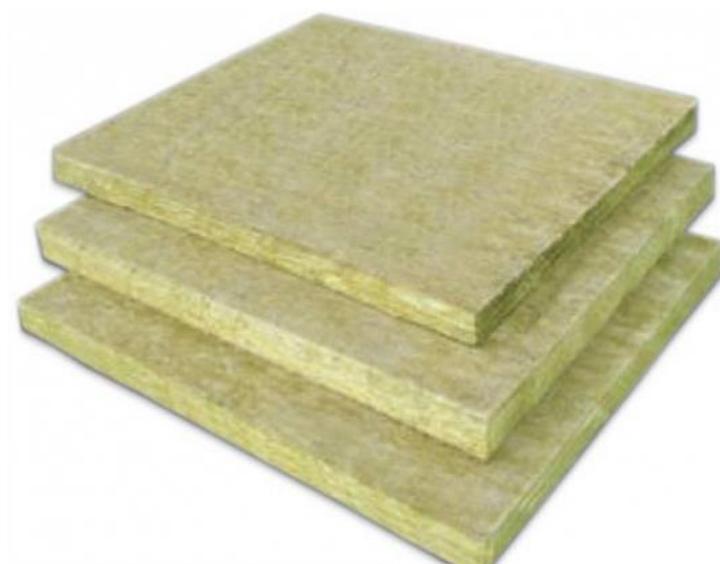


Figura 2.16 – Painel de lã de rocha.

Fonte: Sotecnisol (2017).

CAPÍTULO 2

A Sotecnisol (2017) dá algumas especificações técnicas para os painéis de lã de rocha:

Composição: lã de rocha

Densidade: 150 a 175 kg/m³

Tamanho: 1200 X 1000 mm

Espessuras: 30/40/50/60/70/80 e 100 mm

Reação ao fogo: N 50 e N 75 Incombustível – Euroclasse A1 | B 50 e B 75 Indeterminado – Euroclasse F

Absorção de água: $W_s \leq 1,0$ kg/m³

Fator de difusão ao vapor de água: $\mu = 1,3$

Tabela 2.4 – Coeficientes de absorção do painel de lã de rocha de 50 mm.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
N 50 B 50	0,15	0,67	1,08	1,18	1,03	1,02
N 75 B 50	0,19	0,70	1,07	1,10	1,08	0,96

Fonte: Adaptado de Sotecnisol (2017).

É possível observar na Tabela 2.4 que em termos de absorção acústica não há uma diferença muito grande entre os coeficientes dos dois tipos de painéis.

Lã de Vidro

O exemplo utilizado para ilustrar as propriedades da lã de vidro são os painéis de lã de vidro revestidos com alumínio, como pode ser visto na figura abaixo:

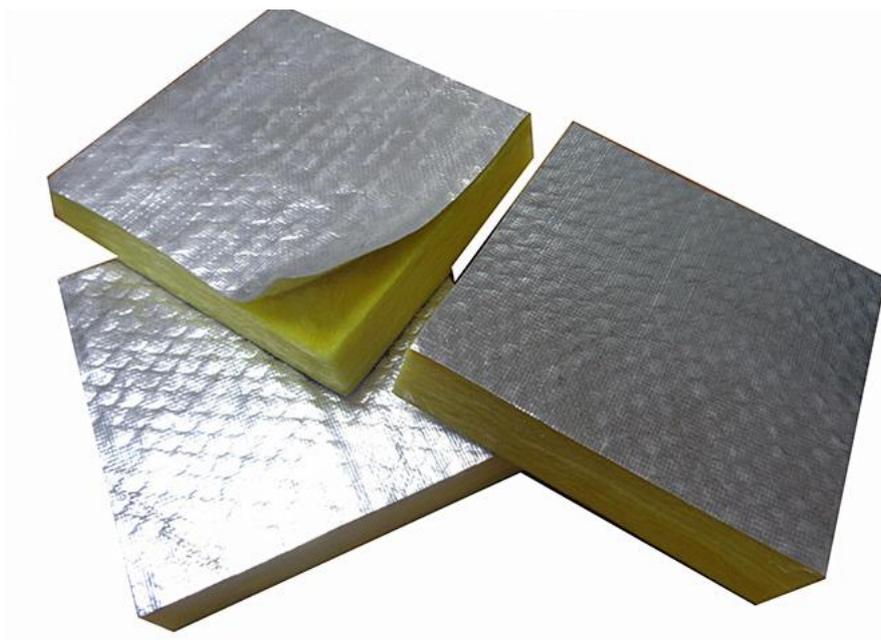


Figura 2.17 – Painel de lã de vidro.

Fonte: Alibaba (2017).

De acordo com o catálogo Isover (2017), as principais características dos painéis de lã de vidro são:

Composição: lã de vidro

Espessura padrão: 25 mm

Dimensões padrão: 300 X 119 mm

Condutibilidade térmica: 0,032 W/m.K

Resistência térmica: $R \geq 0,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$

Os coeficientes de absorção sonora médios são dados na tabela abaixo:

Tabela 2.5 – Coeficientes de absorção sonora do painel de fibra de vidro.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000
α	0,20	0,20	0,20	0,60	0,50

Fonte: Adaptado de Isover (2017).

É possível observar na Tabela 2.5 que o melhor coeficiente de absorção acústica se dá na frequência de 1000 Hz, ainda sendo boa nas frequências altas, mas não muito vantajosa nas frequências mais baixas.

Celulose Projetada

É um produto de origem vegetal, com mais de 80% de papel reciclado e com tratamento contra o fogo (Stier – Soluções Acústicas, 2017).



Figura 2.18 – Celulose sendo projetada em parede.

Fonte: Stier – Soluções Acústicas (2017).

O fabricante apresenta algumas especificações do produto da marca CELBAR Sprayon:

Composição: celulose

Coefficiente de condutibilidade térmica: 0,029 W/m°K

Fazendo uma comparação entre os coeficientes de absorção de vários materiais com a celulose, tem-se:

Tabela 2.6 – Coeficientes de absorção sonora de diversos materiais absorvedores sonoros.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
CELBAR Sprayon 50 mm	0,26	0,68	1,05	1,10	1,03	0,98
Lã de rocha 50 mm 70 kg/m ³	0,19	0,40	0,90	1,00	1,00	1,00
Lã de vidro 50 mm 35 kg/m ³	0,18	0,59	1,03	1,10	1,02	0,97
Poliuretano projetado 50 mm	0,06	0,20	0,58	0,72	0,80	0,78
Poliuretano em placas 50 mm	0,08	0,25	0,61	0,92	0,95	0,92

Fonte: Adaptado de Stier – Soluções Acústicas (2017).

De acordo com a Tabela 2.6, a celulose projetada possui uma absorção sonora igual ou melhor do que vários produtos, sendo a maior vantagem nas frequências mais baixas, onde a diferença é mais interessante.

Cortiça

Conforme Dofsa (2017) o sistema de aglomerar a cortiça em placas preserva o ar dentro das células da cortiça, tornando-a uma ótima solução acústica. Seu aspecto final pode ser observado na figura abaixo:



a) Vista superior das placas de aglomerado de cortiça



b) Vista lateral das placas de aglomerado de cortiça

Figura 2.19 – Placas de aglomerado de cortiça.

Fonte: Dofsa (2017).

Algumas especificações fornecidas pelo site são:

Composição: cortiça

Densidade padrão: $170 \text{ kg/m}^3 (\pm 5\%)$

Dimensões padrão: $1000 \times 500 \text{ mm} (\pm 1 \text{ mm})$

Espessuras padrão: 10/20/30/40/50 e 60 mm ($\pm 1 \text{ mm}$)

Resistência à difusão de vapor de água: $8 \leq \mu \leq 15$

Absorção de água: $< 2 \text{ kg/m}^2$

Durabilidade: tende ao infinito

A média dos coeficientes de absorção para 20 mm e 60 mm e para diferentes tipos de acabamento é dada por:

Tabela 2.7 – Coeficientes de absorção sonora da placa de aglomerado de cortiça.

				Espessura	20 mm	60 mm
α	Superfície retificada por lixagem			0,20	0,55	
				Classe E	Classe D	
α	Superfície de moldagem			0,15	0,50	
				Classe E	Classe D	

Fonte: Adaptado de Dofsa (2017).

Como pode ser visto na Tabela 2.7, é mais vantajoso, no aspecto da absorção acústica, quando a superfície é retificada por lixagem. Também se observa que a placa com 60 mm possui uma absorção acústica consideravelmente maior do que a placa de 20 mm.

Espuma de Poliuretano

A aparência das placas de aglomerado de espuma de poliuretano pode ser vista na figura abaixo:

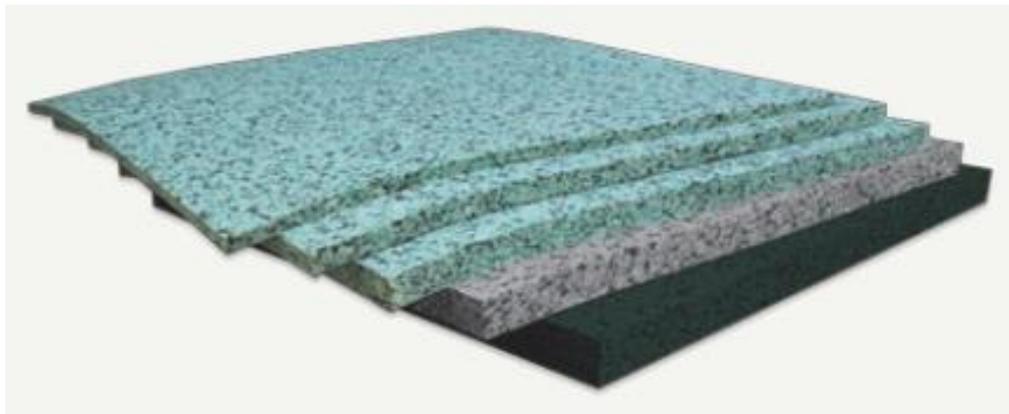


Figura 2.20 – Aglomerado de espuma de poliuretano.

Fonte: Ferreira (2017).

Conforme traz o site Martins Ferreira (2017), algumas das principais características desse aglomerado são:

Composição: poliuretano

Espessuras: 20/30/40/50/60/80 e 100 mm

Dimensões: 600 X 600 mm e 1200 X 600 mm

O catálogo do fabricante apresentado pelo vendedor mostra os coeficientes de absorção acústica para dois modelos de aglomerados com espessura de 30 mm e 60 mm, apresentados na tabela abaixo:

Tabela 2.8 – Coeficientes de absorção sonora de aglomerado de espuma de poliuretano.

Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
PUR	30	0,10	0,25	0,48	0,66	0,79	0,92
	60	0,25	0,55	0,92	1,00	1,00	1,00
AGL	30	0,09	0,25	0,61	0,88	0,84	0,78
	60	0,23	0,58	1,00	1,00	0,93	0,83

Fonte: Adaptado de Ferreira (2017).

A Tabela 2.8 indica que, no geral, os dois modelos trazem valores de absorção acústica semelhantes. Pode-se notar, também, que para as duas espessuras, a diferença maior de absorção se dá nas frequências mais baixas, tendo valores parecidos nas frequências mais altas.

Painéis Acústicos

Para exemplificar os painéis, serão utilizados os painéis acústicos de madeira sem espuma, sendo que existem opções com espuma e de variados formatos. A figura abaixo dá uma noção de como é um painel acústico.



Figura 2.21 – Painel acústico.

Fonte: Som e Acústica (2017).

O site dá algumas especificações do produto, como:

Composição: madeira

Tamanho: 595 X 595 X 60 mm – sem espuma

Massa: 1,75 kg

Alcance de absorção: 400 Hz a 3150 Hz

Coefficiente de absorção médio: $\alpha = 0,7$

Os coeficientes de absorção (eixo y) em relação às frequências em Hz (eixo x) podem ser observados na figura abaixo:

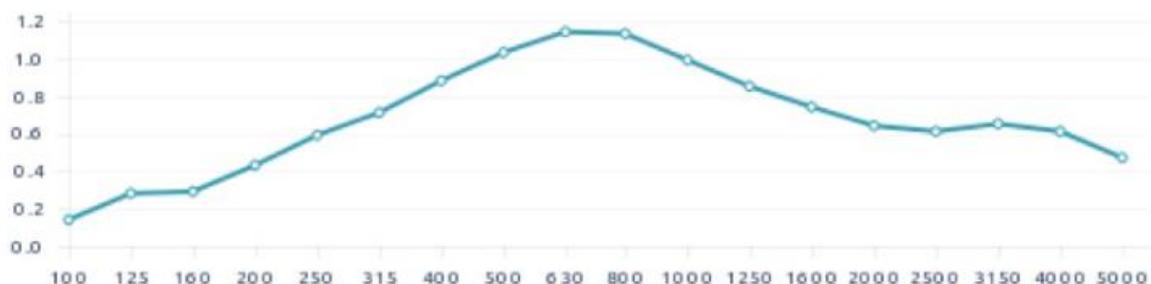


Figura 2.22 – Coeficientes de absorção do painel acústico.

Fonte: Som e Acústica (2017).

A Figura 2.22 mostra que os maiores coeficientes de absorção estão contidos a partir dos 300 Hz, por isso a especificação da faixa de frequência do material. Até os 1250 Hz há uma boa absorção, que vai decaindo não linearmente com o avançar das frequências.

Diversos

A LogAcústica (2017) disponibiliza os valores de coeficientes de absorção sonora de diversos materiais e elementos, como pode ser visto na tabela abaixo:

Tabela 2.9 – Coeficientes de absorção sonora de diversos materiais e elementos.

Frequências (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
Paredes e Tetos	Betão, alvenaria de tijolo rebocada	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03
	Madeira em superfície rígida	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	Gesso acartonado (13 mm), 10 cm caixa de ar	0,08	0,11	0,05	0,03	0,02	0,03
	Gesso acartonado (2x13 mm), 5 cm caixa de ar com lã mineral	0,15	0,10	0,06	0,04	0,04	0,05
	Gesso acartonado (13 mm), 10 cm caixa de ar com lã mineral	0,30	0,12	0,08	0,06	0,06	0,05
	Madeira (9,5-12,7 mm), 5-10 cm caixa de ar	0,30	0,25	0,20	0,17	0,15	0,10
Pavimentos	Pavimento rígido (cerâmicos, mármore, betão)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	Linóleo/vinílico em pavimento rígido	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05
	Madeira em pavimento rígido	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02
	Soalho com caixa de ar	0,12	0,10	0,06	0,05	0,05	0,06
	Plataforma de madeira com grande espaço de ar	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
	Alcatifa delgada, base rígida	0,02	0,04	0,08	0,20	0,35	0,40

	Alcatifa espessa, base rígida	0,02	0,06	0,14	0,37	0,60	0,65
Diversos	Espelho de água numa piscina	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
	Vãos envidraçados	0,12	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02
	Portas em madeira	0,14	0,10	0,08	0,08	0,08	0,08
	Grelhas de ventilação (50% da área aberta)	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
	Aberturas (menor dimensão > 1m)	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Difusor QRD 1D N=7	0,11	0,20	0,07	0,08	0,60	0,06
	Difusor QRD 2D N=7	0,14	0,12	0,14	0,20	0,09	0,12

Fonte: Adaptado de LogAcústica (2017).

É possível observar, através da Tabela 2.9, que a maioria dos materiais e elementos usuais da construção civil possuem um baixo coeficiente de absorção sonora, comparados aos materiais abordados nesta seção. Dessa forma, é notável a necessidade de materiais específicos para a composição de um compartimento onde o tempo de reverberação seja importante.

2.3.2 Estruturas e Materiais Utilizados no Brasil

A seguir serão apresentados os materiais mais utilizados para a absorção acústica no Brasil, além de estruturas que, juntamente com estes materiais, potencializam a absorção sonora.

Espumas Absorvedoras

As espumas absorvedoras possuem diversas cores e formatos, para diferentes necessidades. A Figura 2.23 traz uma ideia de como elas podem se apresentar no mercado.



Figura 2.23 – Espumas absorvedoras.

Fonte: Super Acústica (2017).

Conforme o Super Acústica (2017), as especificações deste material são:

Classificação: absorvedor acústico

Composição: espuma flexível de poliuretano auto extingüível

Densidade: 26 kg/m³

Modulação: 1000 X 1000 mm, 1000 X 500 mm e 500 X 500 mm

Espessura perfilados: 20/35/50 e 75 mm

Espessura: 20/25/30/35/50/50 e 75 mm

Seu coeficiente de absorção pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 2.10 – Coeficientes de absorção sonora das espumas absorvedoras.

Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
Espessura (mm)	25	0,06	0,11	0,18	0,38	0,51	0,52
	35	0,06	0,17	0,45	0,75	0,88	0,80
	50	0,10	0,27	0,59	0,80	0,90	0,86
	75	0,19	0,85	1,02	0,97	0,97	0,99

Fonte: Adaptado de Super Acústica (2017).

A Tabela 2.10 mostra que, para esta espuma, a absorção é maior para frequências maiores, sendo que sua espessura também tem uma importância significativa no aumento do coeficiente de absorção.

Lã de Rocha – Pannel PSL-32

A lã de rocha pode ser vista na figura abaixo, apresentada nas suas diversas formas de apresentação.



Figura 2.24 – Lã de rocha.

Fonte: Neotérmica (2017).

As especificações técnicas dessa lã de rocha, de acordo com Super Acústica (2017), são:

Classificação: absorvedor de ruídos

Composição: aglomerado de resinas especiais

Densidade: 32 kg/m³

Dimensões: 1200 X 600 mm

Espessuras: 25/51/75 e 100 mm

A lã de rocha possui os seguintes coeficientes de absorção acústica:

Tabela 2.11 – Coeficientes de absorção sonora da lã de rocha.

Frequência (Hz)		125	250	500	1000	2000	4000
Espessura (mm)	51	0,16	0,52	0,82	0,92	0,94	0,96
	100	0,85	0,98	1,01	1,11	1,09	1,18

Fonte: Adaptado de Super Acústica (2017).

É possível observar, na Tabela 2.11, que à medida que a frequência aumenta, a diferença de absorção entre as duas espessuras não é tão significativa quanto nas frequências mais baixas.

Lã de Vidro

Na imagem abaixo é possível observar a lã de vidro em algumas formas em que é comercializada.



Figura 2.25 – Lã de vidro.

Fonte: Neotérmica (2017).

Conforme a Neotérmica (2017), algumas das especificações técnicas da lã de vidro são:

Composição: fibra de vidro

Densidade: 10 kg/m³ a 100 kg/m³

Dimensões: 40 X 50 mm

Na tabela a seguir, pode-se observar os valores do coeficiente de absorção acústica da lã de vidro para uma determinada espessura e para várias faixas de frequências:

Tabela 2.12 – Coeficientes de absorção sonora da lã de vidro.

Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
α	0,12	0,69	0,98	1,02	1,05	1,06

Fonte: Adaptado de Neotérmica (2017).

Pode-se visualizar que, na Tabela 2.12, a diferença de absorção entre as frequências mais baixas é maior, distinto das frequências mais altas.

Lã de Pet

A Figura 2.26 mostra uma das formas de utilização da lã de pet que, além de rolo, pode ser adquirida em forma de placa.



Figura 2.26 – Lã de pet.

Fonte: Neotérmica (2017).

Ainda de acordo com Neotérmica (2017), tem-se as seguintes especificações do material:

Composição: poliéster reciclado

Densidade: 5/7/10/15/25 e 35 kg/m³

Espessuras: 10/15/25/35/50/75 e 100 mm

Dimensões: bobinas de 25,0 X 1,20 m e placas de 1,20 X 0,60 m

Quando instalada corretamente, tem a capacidade de isolar ou absorver ruídos.

Ressonadores/Painéis Perfurados

Como mencionado anteriormente, na figura abaixo é apresentado um exemplo de painel perfurado.

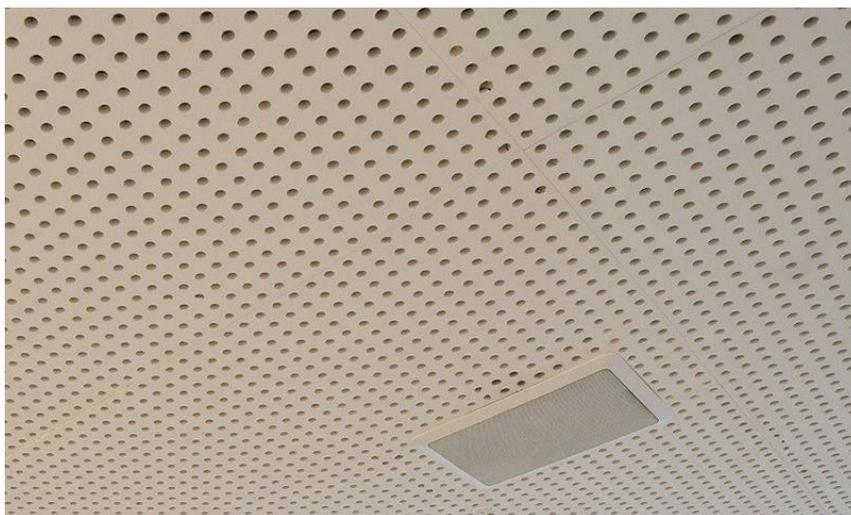


Figura 2.27 – Painéis perfurados.

Fonte: FAUUSP (2017).

Os painéis podem ser feitos de madeira compensada naval ou madeira convencional, MDF, HDF, chapas de OSB, fibra prensada, lâminas plásticas, chapas metálicas, chapas de fibrocimento, placas de gesso, CTCs (compósitos termoplásticos celulósicos), chapas Eucatex, Duratex, entre outros (Cysne, 2016). O autor ainda considera esse tipo de estrutura como integrante do grupo de ressonadores.

A eficiência do sistema é maior quando a placa é associada a um material absorvente, ou seja, quando um dos materiais citados anteriormente e colocado na caixa-de-ar do conjunto.

Diversos

Além dos materiais constituintes das superfícies do compartimento, há outros fatores que influenciam no tempo de reverberação, como pode ser percebido na tabela abaixo.

Tabela 2.13 – Coeficientes de absorção sonora de pessoas e mobiliário.

Frequências (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Pessoa de pé	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37
Pessoa sentada no chão (uma pessoa por m ²)	0,17	0,36	0,47	0,52	0,53	0,46
Adulto sentado, incluindo cadeira	0,20	0,28	0,32	0,37	0,41	0,44
Criança sentada, incluindo cadeira	0,17	0,21	0,26	0,30	0,33	0,37
Músico de orquestra com instrumento	0,40	0,85	1,15	1,40	1,30	1,20
Cadeira de madeira simples, vazia, ou pequena mesa	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,05
Cadeira de palhinha	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Carteira escolar, vazia	0,02	0,02	0,03	0,04	0,06	0,08
Carteira escolar, ocupada	0,18	0,24	0,28	0,33	0,37	0,39
Poltrona de auditório de madeira	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,06
Poltrona de auditório de madeira, com assento móvel levantado	0,02	0,02	0,02	0,04	0,04	0,03
Poltrona de auditório estofada, com assento móvel levantado	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Poltrona de auditório, estofada e ocupada	0,39	0,38	0,38	0,38	0,42	0,42

Fonte: Adaptado de Bistafa (2006, p. 237).

Através da Tabela 2.13 pode-se notar que os materiais menos densos e que contém tecido são os que mais contribuem para a absorção acústica. Assim sendo, há uma diferença significativa no tempo de reverberação conforme os móveis e a quantidade de pessoas presente no compartimento.

Pode-se observar, portanto, que os materiais utilizados tanto em Portugal quanto no Brasil, são muito semelhantes, fazendo com que este estudo possa servir de base para ambos os países, assim como as possíveis soluções acústicas a serem adotadas. Essa similaridade se traduz na globalização da tecnologia de materiais e em sua acessibilidade aos profissionais, resultando em uma uniformidade do potencial da acústica nas construções.

2.4 LEGISLAÇÃO

Serão descritas as principais normas e regulamentos a respeito dos tempos de reverberação, com ênfase na legislação europeia e brasileira.

2.4.1 Legislação Portuguesa

Consoante a Sociedade Portuguesa de Acústica (2017), a legislação portuguesa principal acerca da acústica nos edifícios baseia-se no RGR – Regulamento Geral do Ruído – e no RRAE – Regulamentos dos Requisitos Acústicos dos Edifícios. A última versão do RGR é de janeiro de 2007, já a do RRAE é de junho de 2008.

O RGR tem a finalidade de salvaguardar a saúde humana e garantir o bem-estar das populações, sendo aplicado a todo o ruído de vizinhança, atividades ruidosas permanentes ou temporárias e fontes de ruído suscetíveis a causar incômodo. Dessa forma, este regulamento contribui para controlar e prevenir o ruído nos edifícios, não levando em conta o tempo de reverberação por não tratar de compartimentos.

Já o RRAE tem por base regular o conforto acústico das edificações a fim de contribuir para o bem-estar e para a saúde das pessoas, utilizadores dos edifícios, durante toda a sua vida útil. O regulamento estabelece limites para o tempo de reverberação de acordo com o volume do compartimento. Para salas de aula, auditórios, bibliotecas, salas polivalentes e refeitórios, o tempo de reverberação deve respeitar os seguintes limites:

- $TR_{500\text{Hz}-2\text{kHz}} \leq 0,15V^{1/3}$ (com o volume em m^3)
- $TR_{500\text{Hz}-2\text{kHz}} \leq 0,12V^{1/3}$ se os espaços forem dotados de sistema de difusão pública de mensagens sonoras

O RRAE admite compartimentos mobilados normalmente e sem ocupação com o tempo de reverberação obtido para bandas de oitava centradas nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz. Além disso, considera como sendo de acordo com os requisitos acústicos aplicáveis, o edifício ou compartimento que, tendo seu tempo de reverberação TR diminuído do valor de 25% do limite regulamentar, satisfaça tal limite.

2.4.2 Legislação Brasileira

Quando se fala em legislação brasileira, o foco se dá sobre a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – que é a responsável pela normalização acerca determinados temas. Tais normas são chamadas de NBR – Normas Brasileiras – e, de acordo com ProAcústica (2017), àquelas referentes à acústica são:

- NBR 10151:2000 | Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento

Essa norma determina algumas condições admissíveis de ruído em comunidades.

- NBR 10152:1987 | Níveis de ruído para conforto acústico – Procedimento

Aqui são definidos níveis de ruídos relacionados ao conforto acústico em diversos ambientes.

- NBR 16313:2014 | Acústica – Terminologia

Nesta norma são estabelecidos alguns termos e definições utilizadas na acústica.

- NBR 15575:2013 | Edificações habitacionais – Desempenho

A norma de desempenho estabelece requisitos mínimos para a qualidade de uma obra. Sua divisão se dá conforme os vários sistemas existentes em uma construção.

Grande parte das normas são antigas e não passaram por revisões. A mais recente não é disponível gratuitamente, tornando difícil a sua consulta para compor este trabalho.

A NBR 12179:1992 aconselha que a estimativa do tempo de reverberação em ambientes onde o som seja difuso ocorra através da fórmula de Sabine ou por meio da fórmula de Eyring. Além disso, estabelece alguns tempos ótimos de reverberação de acordo com a ocupação do compartimento, como pode ser observado na figura abaixo:



Figura 2.28 – Tempo ótimo de reverberação.

Fonte: Adaptado de NBR 12179 (ABNT, 1992, p. 9).

A Figura 2.28 apresenta como é obtido o tempo ótimo de reverberação, que depende do volume do recinto e da sua ocupação.

2.4.3 Outros Países

As normas e legislações de alguns outros países serão apresentadas para servirem de referência aos valores citados anteriormente. Serão abordados os limites e as considerações para a Alemanha, Espanha, Estados Unidos, França, Noruega, Reino Unido e Suécia.

De acordo com a norma DIN 18041 da Alemanha (2004 apud OWA, 2017), o tempo de reverberação médio dos compartimentos é calculado através das seguintes expressões:

- Salas de aula, auditórios e creches: $T = 0,32 \times \log(V) - 0,17$
- Lobby, rota de fuga e escadaria ($100 \text{ m}^3 \leq V \leq 800 \text{ m}^3$): $T = V / 1000 + 0,8$
- Ginásios esportivos (aulas para um grupo): $T = 1,27 \times \log(V) - 2,49$
- Ginásios esportivos (aulas para múltiplos grupos): $T = 0,95 \times \log(V) - 1,74$

Deve-se também levar em conta que os tempos de reverberação são para as frequências de 500 Hz e 1000 Hz e que o valor obtido para o compartimento vazio não deve ser maior que 0,2 s mais o valor estimado para o local ocupado.

Na Espanha, o *Documento Básico HR – Protección frente al ruido* (2009) estipula que, para as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, o tempo de reverberação seja orientado da seguinte forma:

- Salas de aula e salas de conferência vazias com assentos ($V \leq 350 \text{ m}^3$): $TR \leq 0,5 \text{ s}$
- Salas de aula e salas de conferência vazias e sem assento ($V \leq 350 \text{ m}^3$): $TR \leq 0,7 \text{ s}$
- Restaurantes e refeitórios vazios: $TR \leq 0,9 \text{ s}$

Nos Estados Unidos da América, o ANSI (*American National Standards Institut*) juntamente com a ASA (*Acoustical Society of America*) têm a norma ANSI/ASA S12.60 que, de acordo com Costa (2014), configuram o TR médio a partir das frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, tendo em consideração os seguintes limites:

- Espaços de aprendizagem principal ($V \leq 283 \text{ m}^3$): $TR < 0,6 \text{ s}$
- Espaços de aprendizagem principal ($283 \text{ m}^3 < V \leq 566 \text{ m}^3$): $TR < 0,7 \text{ s}$
- Espaços de aprendizagem secundários ($V > 566 \text{ m}^3$): Sem prescrição

Na França, de acordo com a NBN S 01-401 (1987 apud Costa, 2014), a estimativa do tempo de reverberação se dá pela média aritmética dos valores obtidos para salas de aulas mobiliadas e desocupadas nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, colocando os seguintes limites:

- Salas de aula, salas de música, creches ($V \leq 250 \text{ m}^3$): $0,4 \text{ s} \leq T \leq 0,8 \text{ s}$

- Salas de aula, salas de música, bibliotecas, escritórios ($V > 250 \text{ m}^3$): $0,6 \text{ s} \leq \text{TR} \leq 1,2 \text{ s}$

Já na Noruega, o autor Silva (2013) também expõe o uso da norma NS 8175 de 2012 que, de acordo com a fórmula abaixo, deve resultar em um valor abaixo de 0,6 s.

- $\text{TR} \leq 0,2 \times \text{altura média da sala (m)} < 0,6 \text{ s}$

Dito isso, a altura média máxima do compartimento só poderá ser de 3 m, sendo essa uma forma de limitar de uma forma diferente o volume dos ambientes.

O *Building Bulletin 93 – Acoustic Design of Schools* (BB93, 2003), legislação do Reino Unido, define o TR como a media aritmética dos TRs das bandas de oitava de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz e estipula os seguintes limites:

- Salas de infantário e escolas primárias: $\text{TR} < 0,6 \text{ s}$
- Salas de aula – escolas primárias: $\text{TR} < 0,6 \text{ s}$
- Salas de aula – secundárias: $\text{TR} < 0,8 \text{ s}$
- Auditórios (< 50 pessoas): $\text{TR} < 0,8 \text{ s}$
- Auditórios (> 50 pessoas): $\text{TR} < 1,0 \text{ s}$

Por fim, de acordo com Silva (2013), na Suécia, em 2007, foi implementada a norma SS25268 que determina os tempos de reverberação abaixo para as bandas de oitava de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Para escolas, creches e atividades de tempos livres:

- Salas de aula: $\text{TR} \leq 0,5 \text{ s}$
- Salas de música: $\text{TR} \leq 0,6 \text{ s}$
- Escritórios e bibliotecas: $\text{TR} \leq 0,6 \text{ s}$
- Corredores e entradas: $\text{TR} \leq 0,5 \text{ s}$
- Escadarias: $\text{TR} \leq 0,8 \text{ s}$

Para ensino secundário e superior:

- Salas de aula: $\text{TR} \leq 0,6 \text{ s}$
- Salas de música: $\text{TR} \leq 0,8 \text{ s}$
- Escritórios e bibliotecas: $\text{TR} \leq 0,6 \text{ s}$
- Corredores e entradas: $\text{TR} \leq 0,8 \text{ s}$

- Escadarias: $TR \leq 1,5$ s

A tabela abaixo apresenta um resumo da legislação apresentada, focado nas salas de aula.

Tabela 2.14 – Resumo das legislações de alguns países.

País/Legislação	Bandas de Oitava	Tempo de Reverberação (s)
Alemanha DIN 18041	250 Hz a 2000 Hz (4 bandas)	$\leq 0,32 \times \log(V) - 0,17$
Brasil NBR 12179	500 Hz (1 banda)	Conforme diagrama.
Espanha DB-HR	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$\leq 0,5$ se $V \leq 350 \text{ m}^3$ Sem prescrição para $V > 350 \text{ m}^3$
EUA ANSI/ASA S12.60	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$< 0,6$ se $V \leq 283 \text{ m}^3$ $< 0,7$ se $283 < V \leq 566 \text{ m}^3$ Sem prescrição para $V > 566 \text{ m}^3$
França Decreto de 25/04/2003	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$0,4 \leq TR \leq 0,8$ se $V \leq 250 \text{ m}^3$ $0,6 \leq TR \leq 1,2$ se $V > 250 \text{ m}^3$
Noruega NS 8175	125 Hz a 2000 Hz (5 bandas)	$0,2 \times$ altura média da sala $< 0,6$
Portugal RRAE	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$\leq 0,15V^{1/3}$
Reino Unido BB 93	500 Hz a 2000 Hz (3 bandas)	$< 0,8$ para salas de aula $< 1,0$ para auditórios
Suécia SS 25268	250 Hz a 2000 Hz (4 bandas)	$< 0,6$

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 2.14 nota-se que a Alemanha e Portugal levam em consideração o volume do compartimento para estabelecer o TR limite. Por outro lado, a Espanha, os Estados Unidos e a França têm o volume como um balizador, porém nada muito específico. Já o Reino Unido e a Suécia prescrevem limites apenas de acordo com o uso da sala de aula.

3 CASO DE ESTUDO

3.1 DESCRIÇÃO DAS SALAS

O Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) faz parte do Instituto Politécnico do Porto (IPP) e está localizado Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, na cidade do Porto. Sua configuração conta com vários blocos de acordo com as áreas existentes no campus, como pode ser observado a seguir.

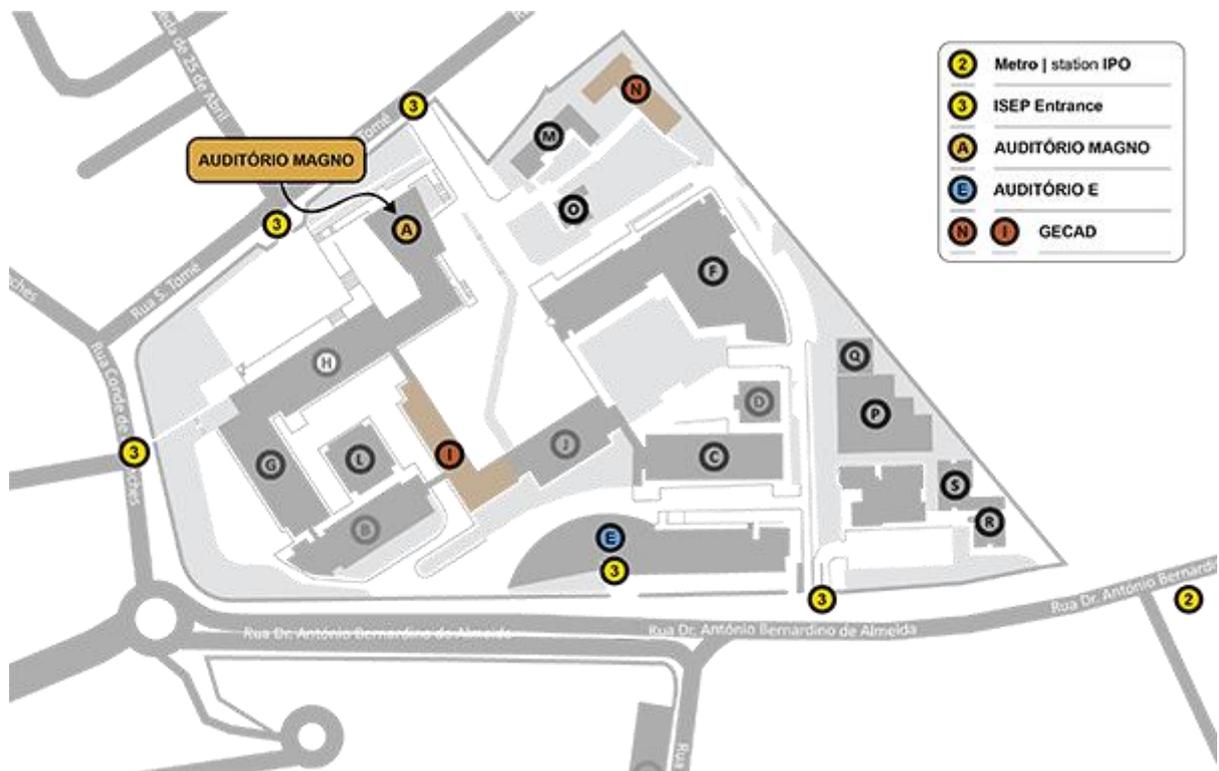


Figura 3.1 – Planta do ISEP.

Fonte: GECAD (2017).

Foram analisadas 7 salas, sendo duas delas em forma de auditório, uma sala de reuniões e quatro salas de aula. O nome das salas de aula é composto por uma letra, que representa o bloco a que ela pertence, e por três números, sendo que o primeiro corresponde ao andar do bloco e os outros dois o número daquela sala naquele andar.

Algumas das principais características destas salas são apresentadas na tabela abaixo e no Anexo I.

Tabela 3.1 – Características das salas analisadas.

Sala Planta	Comp. (m)	Larg. (m)	Alt. (m)	Área (m ²)	Vol. (m ³)	Lotação	Aspetto Visual
Auditório Magno Figura A	24,60	16,70	4,50	400,5	1802,2	450	
Auditório E Figura B	15,25	12,15	4,10	249,0	1014,9	188	
C301 Figura C	13,0	6,30	2,90	81,90	237,51	117	
C302 Figura D	13,0	6,30	2,90	81,90	237,51	117	
I201 Figura E	11,65	8,80	2,60	38,81	266,41	104	

J206 Figura F	11,80	7,50	3,45	88,50	305,33	53	
Sala de Reuniões CTC - Edifício E Figura G	11,15	6,40	3,16	75,70	261,25	29	

Este trabalho conta com três linhas de análise: a primeira compara o TR ensaiado com o TR calculado, a segunda tem por objetivo desenvolver o *feeling* de como determinados aspetos do ambiente podem influenciar no TR e a terceira compara o TR de diferentes salas a fim de verificar quais os principais fatores afetam tais valores e se as salas estão dentro da legislação.

3.2 METODOLOGIA

Para a realização do ensaio para a determinação do tempo de reverberação das salas do ISEP foi utilizado o Sonómetro Brüel & Kjaer 2260 (Figura 3.2), e o emissor Brüel & Kjaer (Figura 3.3).



Figura 3.2 – Sonómetro Brüel & Kjaer.



Figura 3.3 – Fonte sonora omnidirecional Brüel & Kjaer.

Os dados de *input* no equipamento foram baseados na ISO, dessa forma tem-se a utilização de 1 banda de oitava (faixas de frequências fixas para ISO) com frequência inicial de 125 Hz e frequência final de 4000 Hz, de acordo com a NP EN ISO 3382-2 (2011).

O método escolhido foi o Método do ruído interrompido, com dois decaimentos, conforme NP EN ISO 3382-2 (2011) para o método da engenharia – método correspondente com este trabalho – sendo que o tempo de decaimento deve ser de, pelo menos, $TR/2$.

O gerador de ruído é a fonte sonora omnidirecional, ou seja, é externa ao sonómetro. O ruído emitido é o ruído rosa. Como, para o tratamento dos dados, utilizou-se o *software* Qualifier e este determina apenas o TR_{20} e o TR_{30} , o ruído emitido pela fonte sonora foi de 45 dB acima do ruído de fundo para a obtenção do TR_{30} . Dessa forma, para se determinar o TR_{60} , os valores adquiridos pelo ensaio foram multiplicados por dois, já que o decaimento é linear.

A fonte sonora e o sonómetro foram posicionados de acordo com os esquemas apresentados no Anexo I.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados para as três análises propostas neste trabalho, sendo que a primeira irá comparar o TR ensaiado e teórico de cada sala – associada a sugestões de melhoria em algumas delas –, a segunda irá analisar a influência de diferentes fatores nas salas C301 e C302 por serem salas idênticas, porém espelhadas, e a última irá comparar o TR de todas as salas entre elas mesmas e com a legislação supracitada.

4.1.1 Salas

Os TRs teóricos, apresentados no Anexo II, foram determinados com base na fórmula de Sabine pelo fato de que os coeficientes de absorção médios das salas se encaixaram nos parâmetros estabelecidos pela equação, ou seja, $\alpha \leq 0,4$. Os coeficientes de absorção foram retirados de LACAM (2006).

Além disso, os TRs foram ensaiados com -10 dB por conta do sistema AVAC e pelo trânsito de pessoas e veículos próximo às construções. A calibração do equipamento foi realizada antes e depois das medições, conforme instrui a norma. Além disso, o microfone estava a 1,45 m de altura do chão e contou com a presença da mestranda durante a execução dos ensaios.

Auditório Magno

Este é um dos maiores auditórios do ISEP, usado para eventos de grande porte. O ensaio foi realizado no dia 30 de abril, às 17:30, com todas as portas fechadas. Foram utilizadas 3 posições de fonte sonora e 6 posições de microfone para cada posição da fonte, conforme Figura A. Os resultados ensaiados e calculados estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 4.1 – TR₆₀ do Auditório A.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	2,75	1,25	54,5%
250 Hz	2,50	2,65	6,0%
500 Hz	2,35	1,11	52,8%
1000 Hz	2,50	3,08	23,2%
2000 Hz	2,39	0,88	63,9%
4000 Hz	1,97	2,71	37,6%
TRM	2,41	1,95	19,1%

Na Tabela 4.1 é possível notar que o TR efetivo foi maior do que o calculado, sendo a diferença de algumas frequências mais expressivas do que outras. Isso se deve ao fato de que, como as áreas absorventes são relativamente grandes, a escolha dos coeficientes tem grande influência no resultado final, e, como o TR teórico foi baseado em valores gerais, é difícil chegar-se a uma boa precisão.

Desta forma, é de fundamental importância a escolha de bons coeficientes de absorção sonora se houver a necessidade de uma análise mais criteriosa.

Auditório E

O auditório E é um pouco menor do que o auditório anterior e é utilizado para eventos de médio porte.

O ensaio foi realizado no dia 01 de maio às 11:00 horas e contou com duas posições de fonte sonora e 4 posições de sonómetro para cada posição da fonte, de acordo com a Figura B. Os dados obtidos tanto nos ensaios quanto nos cálculos estão contidos na tabela a seguir.

Tabela 4.2 – TR₆₀ do Auditório E.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	2,25	2,15	4,4%
250 Hz	2,07	3,91	88,9%
500 Hz	2,12	1,27	40,1%
1000 Hz	2,23	1,66	25,6%
2000 Hz	2,11	0,65	69,2%
4000 Hz	1,78	0,99	44,4%
TRM	2,09	1,77	15,3%

Na Tabela 4.2, além da mesma diferença notada no Auditório Magno entre o TR ensaiado e o teórico, nota-se que o TR desse auditório é um pouco menor. Isso pode ser explicado pelo fato do piso ser revestido de alcatifa, o que contribui positivamente para a absorção do som.

Sala C301

O ensaio foi realizado no dia 30 de abril às 11:00 horas, o qual contou com 2 posições de fonte sonora e 3 posições de sonómetro para cada posição da fonte, como pode ser visto na Figura C. Os resultados encontrados estão expressos na tabela abaixo.

Tabela 4.3 – TR₆₀ da sala C301.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	4,17	1,82	56,4%
250 Hz	4,35	3,40	21,8%
500 Hz	3,02	2,58	14,6%
1000 Hz	2,50	2,89	15,6%
2000 Hz	2,96	2,69	9,1%
4000 Hz	2,83	3,48	23,0%
TRM	3,30	2,81	14,8%

Através da Tabela 4.3 pode-se notar que nesta sala o TR é maior do que em relação aos auditórios pois estes últimos têm um cuidado maior com a acústica, já que ela possui um impacto mais importante. Também porque possuem elementos intrínsecos mais favoráveis à absorção acústica, como a utilização de poltronas e cortinas. À vista disso, pode-se afirmar que o conforto também contribui para a acústica de um ambiente.

Como possíveis sugestões de melhoria, poderiam ser inseridas cadeiras com assento estofado (TR_I), colocado teto com painel perfurado (TR_{II}) ou essas duas recomendações associadas (TR_{III}). Na tabela abaixo são apresentados os valores teóricos obtidos com essas mudanças, comparados com aqueles calculados inicialmente para dar uma noção da proporção de mudança no TR.

Tabela 4.4 – Sugestões de melhoria para sala C301.

Frequência	TR teórico	TR _I	TR _{II}	TR _{III}
125 Hz	1,82	1,42	0,73	0,66
250 Hz	3,40	2,09	0,44	0,41
500 Hz	2,58	1,58	0,55	0,49
1000 Hz	2,89	1,69	0,60	0,53
2000 Hz	2,69	1,62	1,13	0,88
4000 Hz	3,48	1,88	1,12	0,88
TRM	2,81	1,71	0,76	0,64

A Tabela 4.4 mostra que com a inserção de cadeiras com apenas o assento estofado, há uma diferença de 1,1 s no TR total da sala. Aplicando apenas o painel perfurado no teto, o TR diminui 2,05 s. Já com a aplicação das duas soluções, essa diferença vai para a ordem dos 2,17 s, ou seja, há uma significativa melhoria com o uso destas propostas. Para uma melhor visualização, a tabela foi traduzida no gráfico abaixo.

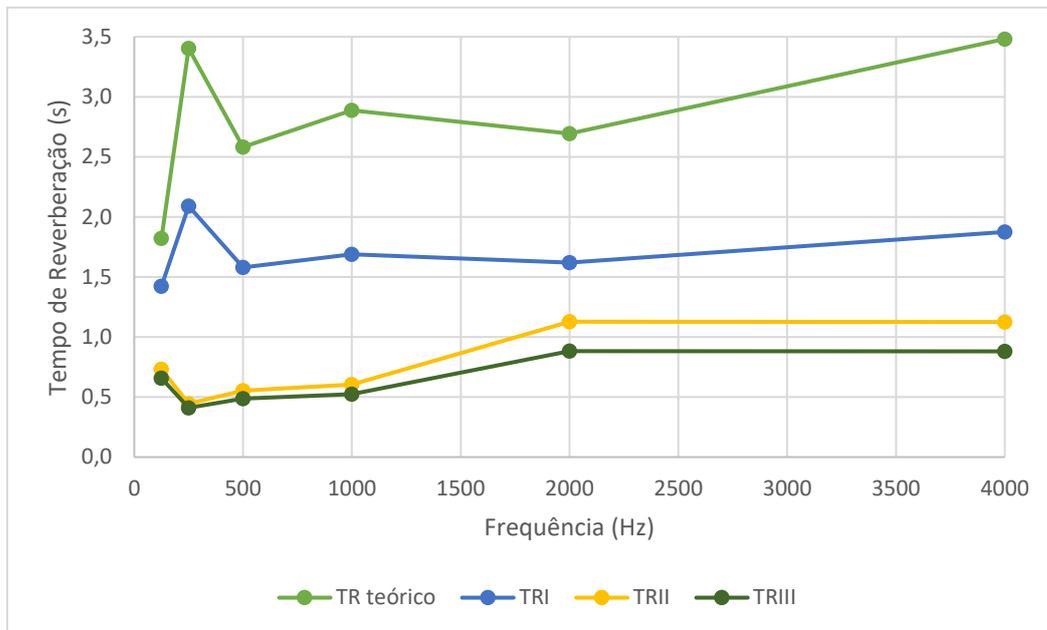


Figura 4.1 – Sugestões de melhoria para a sala C301.

A partir da Figura 4.1, pode-se tirar dizer que, no âmbito do leque de frequências, a utilização destas propostas altera mais significativamente as frequências iniciais e finais. Além disso, só a aplicação do painel perfurado já fica próximo do TR do conjunto, ou seja, o resultado trazido pela mudança do teto tem um impacto maior. Entretanto, é possível afirmar que as soluções apresentadas contribuem consideravelmente para a melhoria do TR da sala.

Sala C302

Este ensaio também foi realizado no dia 30 de abril, às 16:00 horas, o qual também contou com 2 posições de fonte sonora e 3 posições de sonómetro para cada posição de fonte sonora, como observado na Figura D. O ensaio também só contou com a presença de uma pessoa na sala.

Tabela 4.5 – TR₆₀ da sala C302.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	2,67	1,49	44,2%
250 Hz	2,83	3,36	18,7%
500 Hz	2,17	1,74	19,8%
1000 Hz	1,99	2,92	46,7%
2000 Hz	2,44	1,81	25,8%
4000 Hz	2,33	3,44	47,6%
TRM	2,41	2,46	1,2%

Apesar das salas C301 e C302 serem muito semelhantes no sentido de áreas e materiais, percebe-se uma diferença expressiva entre seus TRs apresentada na Tabela 4.5. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que a C302 possui grelhas em baixo dos degraus maiores e em maior quantidade do que na sala C301, como pode ser observado nas figuras abaixo:



a) C301



b) C302

Figura 4.2 – Grelha nos degraus das salas C301 e C302.

Essas grelhas atuam como ressonadores, capturando uma parte do som que passa por eles, fazendo com que o TR seja menor.

Sala I201

O ensaio foi feito no dia 30 de abril às 09:00 horas com as janelas fechadas e os estores erguidos. Houveram 2 posições de fonte sonora e 4 posições de sonómetro para cada posição de fonte sonora, de acordo com a Figura E, cujos resultados estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4.6 – TR₆₀ da sala I201.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	1,73	0,89	48,5%
250 Hz	1,65	1,28	22,4%
500 Hz	1,80	1,57	12,8%
1000 Hz	1,79	1,64	8,4%
2000 Hz	1,87	1,93	3,2%
4000 Hz	1,78	2,07	16,3%
TRM	1,77	1,56	11,9%

Pode observar-se através da Tabela 4.6 que esta sala possui um TR bem inferior aos demais por ser um local que foi concebido pensando na acústica, cujo principal componente é um painel perfurado abrangendo quase toda extensão da parede anterior do ambiente. Esse fato enfatiza a importância em levar em conta a componente da acústica na escolha dos materiais e móveis de um compartimento.

Sala J206

Este ensaio foi realizado no dia 20 de maio às 10:00 horas. A metodologia de ensaio foi a mesma descrita nas salas anteriores, também com duas posições de fonte sonora e três de sonómetro, de acordo com a Figura F. Os resultados estão descritos na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – TR₆₀ da sala J206.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	-	2,79	-
250 Hz	-	3,93	-
500 Hz	4,06	3,12	23,2%
1000 Hz	3,45	3,23	6,4%
2000 Hz	3,43	3,09	10,0%
4000 Hz	2,96	4,67	57,8%
TRM	3,47	3,47	0,0%

A tabela mostra que esta é a sala que apresenta o maior TR e aquela em que mais se assemelham os TRs efetivos e teóricos. Entretanto, é a única em que o TR efetivo não foi capturado nas primeiras frequências das bandas de oitava, podendo ser devido à alguma configuração na sensibilidade dos instrumentos. Entretanto, essa falha não foi aprofundada para manter o padrão das demais salas analisadas. Assim sendo, não é possível estabelecer uma análise sobre semelhança entre o TR efetivo e o teórico, justamente por esta falta de valores.

Aplicando as mesmas sugestões de melhoria apresentadas para a sala C301, tem-se a seguinte tabela.

Tabela 4.8 – Sugestões de melhoria para sala J206.

Frequência	TR teórico	TR _I	TR _{II}	TR _{III}
125 Hz	2,79	2,70	0,91	0,90
250 Hz	3,93	3,47	0,53	0,52
500 Hz	3,12	2,66	0,66	0,63
1000 Hz	3,23	2,58	0,73	0,69
2000 Hz	3,09	2,71	1,32	1,25
4000 Hz	4,67	3,42	1,47	1,31
TRM	3,47	2,92	0,94	0,89

É possível perceber através da Tabela 4.8 que há uma diferença de 0,55 s com a inserção das cadeiras de assento estofado e 2,53 s com a aplicação do painel perfurado no teto. A associação destas soluções resulta em um decréscimo de 2,58 s nesta sala.

Tais valores em forma de gráfico podem ser observados na figura a seguir.

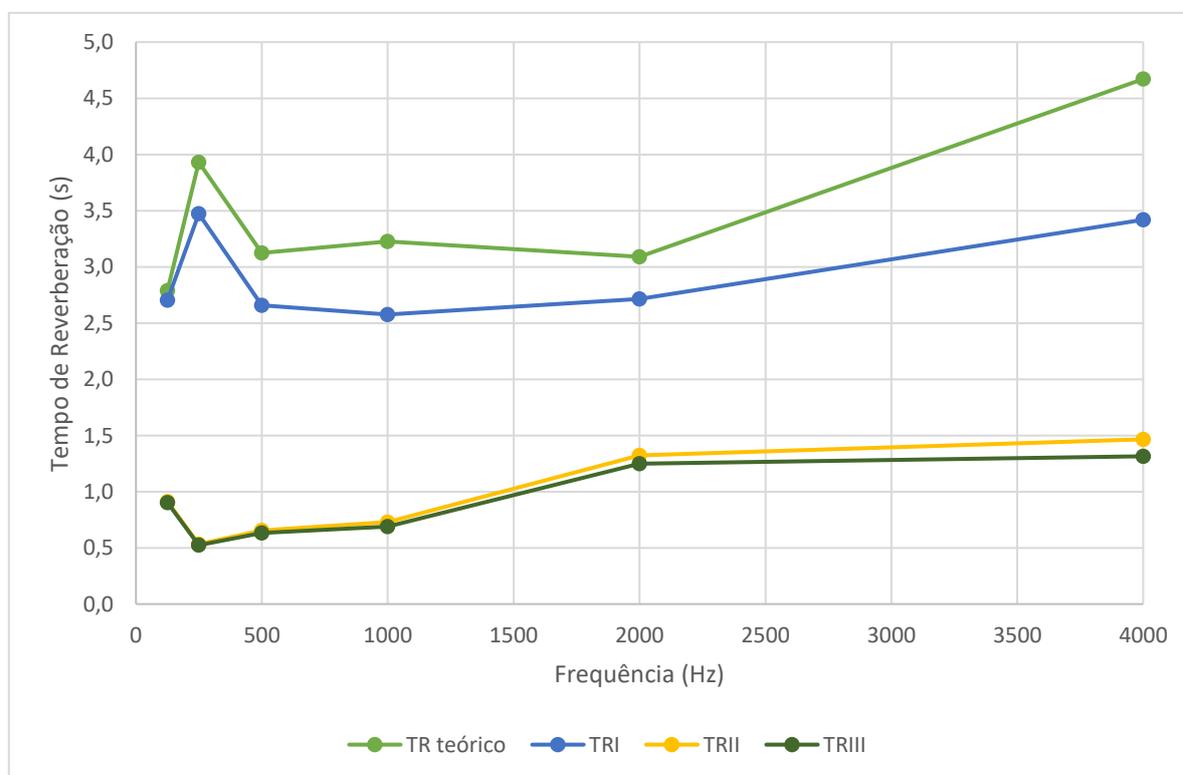


Figura 4.3 – Sugestões de melhoria para sala J206.

Assim como na sala C301, a Figura 4.3 traz que as propostas de melhoria atuam mais nas frequências baixas e altas, também mostra que o acréscimo das cadeiras não tem uma importância muito grande para

o TR, comparado ao uso do painel perfurado. Ainda assim, a associação das soluções potencializa o resultado.

Sala de Reuniões - CTC

Esta sala foi ensaiada no dia 30 de maio às 18:00 horas. A metodologia e os parâmetros de ensaio foram os mesmos utilizados nas demais salas. As posições de fonte sonora e sonómetro se assemelham às salas de aula, como pode ser confirmado na Figura G. Os resultados encontrados estão descritos na tabela a seguir.

Tabela 4.9 – TR₆₀ da Sala de Reuniões – CTC.

Frequência	TR efetivo	TR teórico	Δ%
125 Hz	3,24	2,42	25,3%
250 Hz	3,33	3,55	6,6%
500 Hz	3,00	2,46	18,0%
1000 Hz	3,32	2,79	16,0%
2000 Hz	3,43	2,40	30,0%
4000 Hz	2,95	3,04	3,1%
TRM	3,21	2,78	13,4%

A Tabela 4.9 expressa que o TR desta sala é parecido com o da sala J206 e as duas apresentam os piores valores das salas ensaiadas. Isso decorre pelo fato de que os revestimentos utilizados na sala não possuem valores altos em seus coeficientes de absorção sonora, fazendo com que o TR fique acima do ideal.

Como a sala já apresenta cadeiras estofadas, a sugestão de melhoria é referente apenas à utilização de painel perfurado no teto do compartimento. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4.10 – Sugestão de melhoria para Sala de Reuniões – CTC.

Frequência	TR teórico	TR _i
125 Hz	2,42	0,83
250 Hz	3,55	0,49
500 Hz	2,46	0,58
1000 Hz	2,79	0,66
2000 Hz	2,40	1,13
4000 Hz	3,04	1,20
TRM	2,78	0,82

A Tabela 4.10 indica que, com a aplicação do painel, tem-se uma diminuição de 1,96 s na sala em questão. Para visualizar essa redução é apresentado o gráfico na sequência.

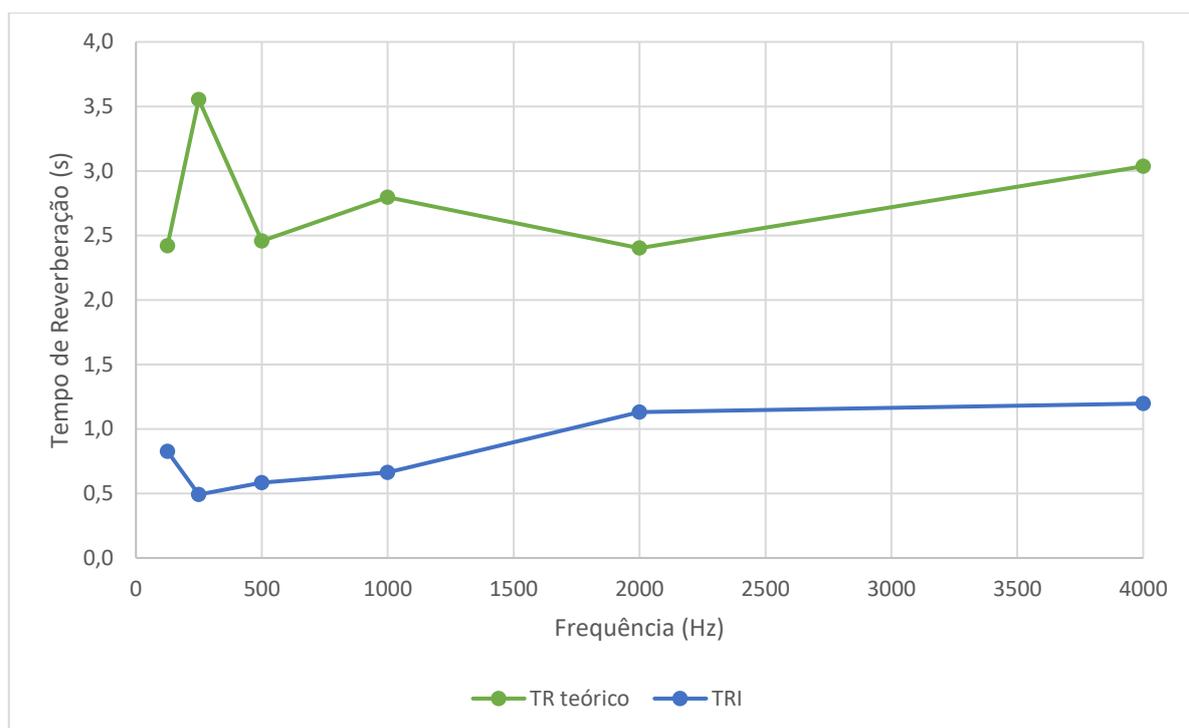


Figura 4.4 – Solução de melhoria para Sala de Reuniões – CTC.

Como esperado, a Figura 4.4 mostra as maiores diferenças nas frequências das extremidades e um resultado satisfatório.

Assim sendo, pode-se afirmar que são notáveis e satisfatórios os efeitos causados no TR pelo uso tanto das cadeiras estofadas quanto do painel perfurado no teto das salas utilizadas como exemplo.

4.1.2 Análise Específica

A análise específica estuda os efeitos de diferentes componentes dentro das salas C301 e C302 e também a relação de TR entre estas, visto que possuem uma estrutura muito parecida, porém espelhada.

Para a sala C301, as variáveis analisadas foram em relação a janelas abertas ou fechadas e estores (persianas) erguidos ou abaixados, conforme descrição a seguir:

TR-1: janelas fechadas e estores erguidos;

TR-2: janelas abertas e estores abaixados;

TR-3: janelas fechadas e estores abaixados.

Os resultados encontrados estão apresentados no gráfico abaixo:

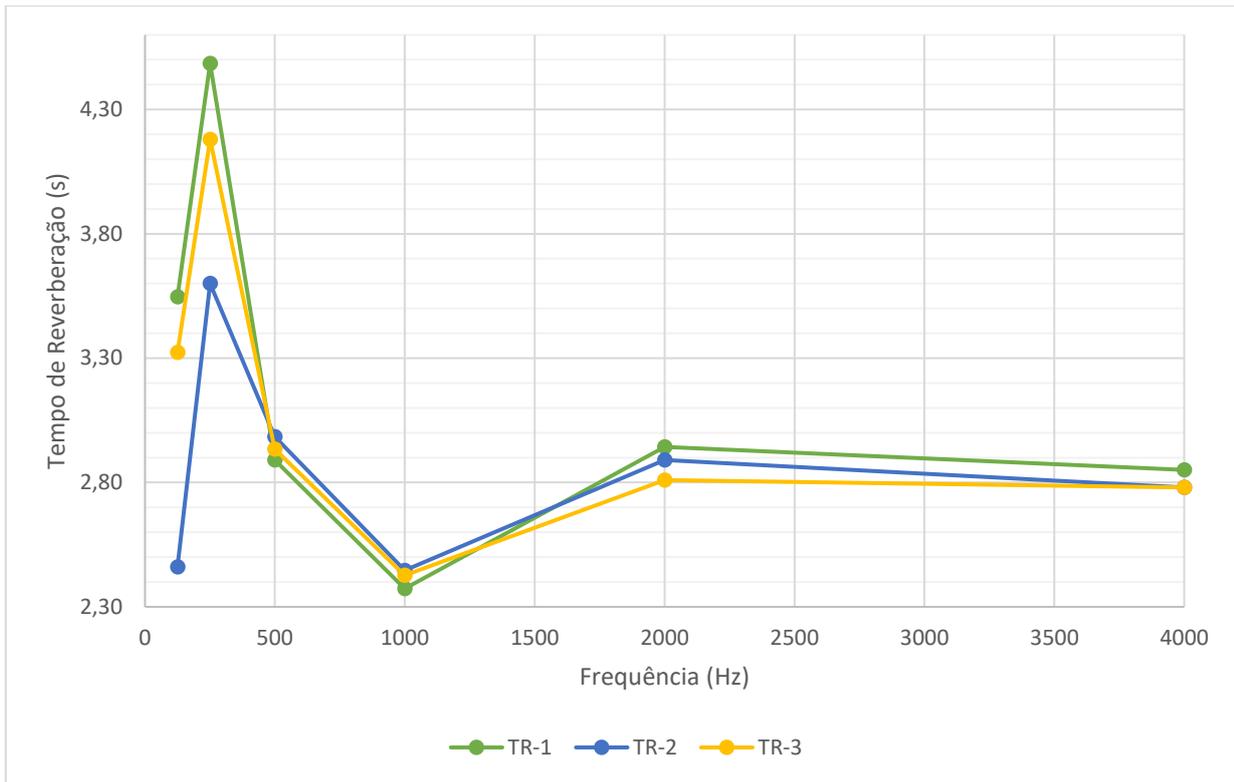


Figura 4.5 – TR₆₀ da sala C301.

A Figura 4.5 mostra que não há diferença significativa com a alteração dos parâmetros mencionados anteriormente. Nas frequências mais baixas, as janelas abertas resultam em um TR menor. Em contrapartida, nas frequências mais altas são os estores abaixados que trazem esse efeito.

Já para a sala C302, as variáveis foram quanto à janela aberta ou fechada, estores erguidos ou abaixados, *blackouts* erguidos ou abaixados, com ou sem pessoas.

TR-1: janelas fechadas, estores erguidos, *blackouts* erguidos e sem pessoas;

TR-2: janelas abertas, estores erguidos, *blackouts* erguidos e sem pessoas;

TR-3: janelas fechadas, estores abaixados, *blackouts* erguidos e sem pessoas;

TR-4: janelas fechadas, estores erguidos, *blackouts* abaixados e sem pessoas;

TR-5: janelas fechadas, estores erguidos, *blackouts* erguidos e com pessoas.

Haviam 20 pessoas na sala sentadas majoritariamente próximas à fonte sonora.

Para ser possível uma melhor observação, pode-se notar a diferença nos tempos de reverberação no gráfico abaixo:

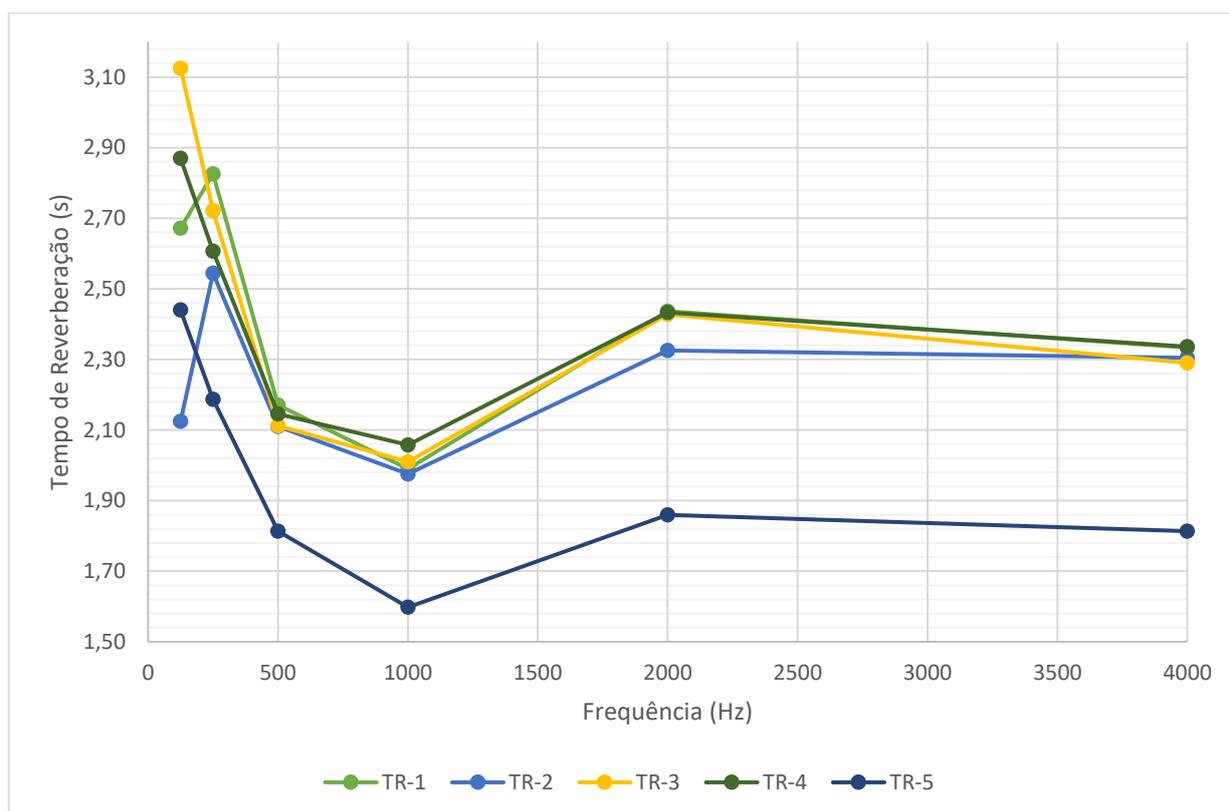


Figura 4.6 – TR_{60} da sala C302.

Tem-se, pela Figura 4.6, que o TR-1 é o que tem, no geral, o maior tempo de reverberação. O TR-3 e o TR-4 quase coincidem, já o TR-2 é ligeiramente menor que estes. Entretanto, o TR-5 é o que apresenta o menor tempo de reverberação.

Em outras palavras, ao abaixar os estores ou os *blackouts*, há uma ligeira diminuição dos tempos de reverberação. Isto porque os materiais constituintes destas estruturas não apresentam coeficientes de absorção sonora consideráveis.

Já quando as janelas são abertas, o TR diminui um pouco mais pois o som, ao invés de permanecer na sala, sai para o exterior. Esta opção pode ser boa para o quesito tempo de reverberação, mas, dependendo do ruído exterior, pode se tornar uma alternativa inviável.

Dessa forma, o que mais deu resultado e o que mais se aproxima da realidade de um ambiente de sala de aula é a presença de pessoas. Mesmo tendo uma lotação de 117 pessoas e o ensaio contar com 20, o resultado foi muito expressivo. Dessa forma, a melhor maneira de diminuir o tempo de reverberação, levando-o a um valor mais próximo do adequado, foi trabalhar mais próximo da lotação total da sala.

Por fim, foi feita uma comparação entre os mesmos parâmetros para as duas salas, como é possível visualizar na tabela a seguir.

Tabela 4.11 – Comparação entre TRs da C301 e C302.

Frequência	TR-1		TR-2		TR-3	
	C301	C302	C301	C302	C301	C302
125 Hz	3,55	2,67	2,46	2,13	3,32	3,13
250 Hz	4,49	2,83	3,60	2,54	4,18	2,72
500 Hz	2,89	2,17	2,98	2,11	2,93	2,11
1000 Hz	2,37	1,99	2,45	1,98	2,43	2,01
2000 Hz	2,94	2,44	2,89	2,33	2,81	2,43
4000 Hz	2,85	2,33	2,78	2,31	2,78	2,29
TRM	3,18	2,40	2,86	2,23	3,08	2,45

A Tabela 4.11 traz que as maiores diferenças entre os TRs estão nas frequências de 250 Hz e 500 Hz, o que, de acordo com a análise dos resultados feita para a sala C302, implica que são nestas frequências que as grelhas em baixo dos degraus atuam melhor no que diz respeito à absorção sonora.

Portanto, pode-se afirmar que as grelhas em espaços confinados trazem um grande benefício ao TR de um compartimento.

4.1.3 Análise Geral

Como última análise, tem-se uma análise geral de todas as salas estudadas, considerando apenas os TRs ensaiados. Os resultados podem ser constatados no gráfico que vem na sequência e na tabela posterior.

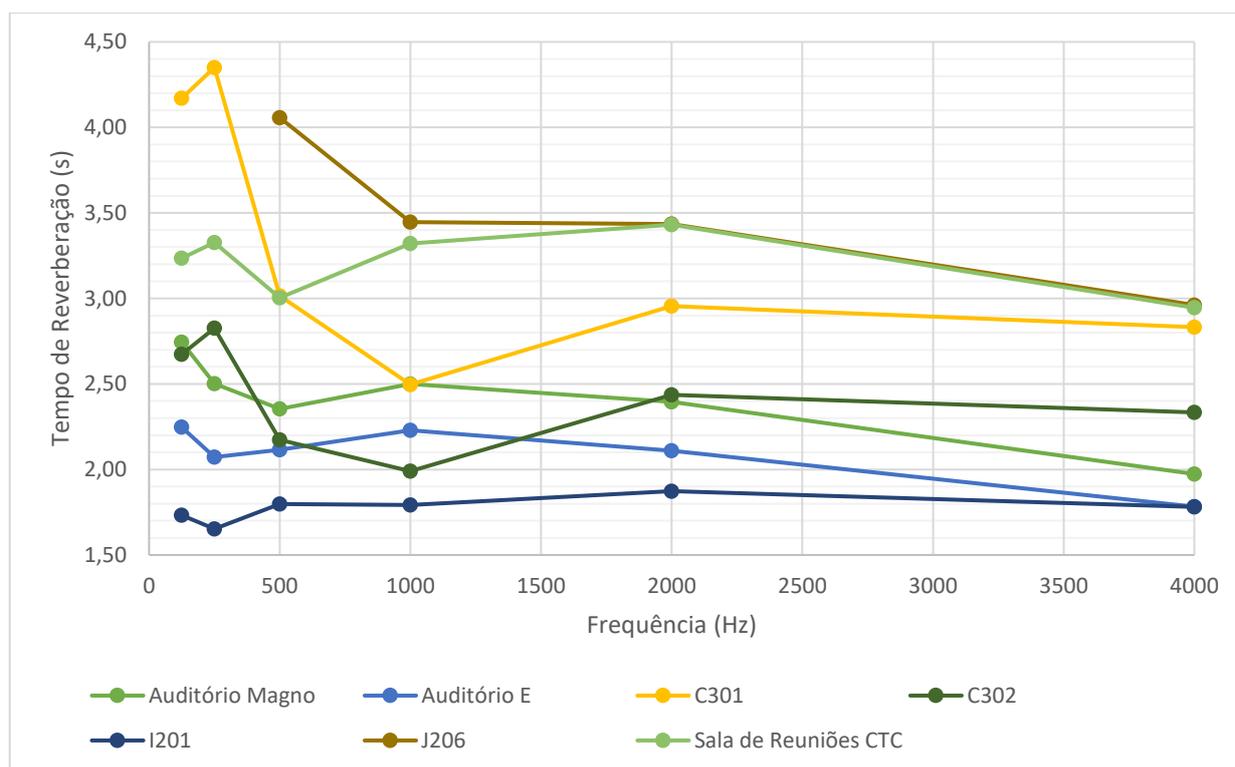


Figura 4.7 – TR_{60} de todas as salas analisadas.

A partir da Figura 4.7 pode-se concluir que a sala que possui o pior TR é a J206 e a que possui o melhor TR é a I201.

As salas também foram analisadas de acordo com os valores de TR recomendados pela legislação. Para o caso da legislação brasileira, por não contar com limites específicos para aqueles estudados neste trabalho, foram utilizados valores de referência, onde os auditórios foram considerados como salas de concerto e o restante como salas de conferência. Os resultados obtidos se encontram na tabela abaixo.

Tabela 4.12 – Comparação entre os TRs ensaiados e aqueles constados na legislação.

País Legislação	Auditório Magno	Auditório E	C301	C302	I201	J206	Sala de Reuniões - CTC
Alemanha DIN 18041	2,44 > 0,87	2,13 > 0,79	3,20 > 0,59	2,36 > 0,59	1,78 > 0,61	3,65 > 0,63	3,27 > 0,60
Brasil NBR 12179	2,35 > 1,23	2,12 > 1,10	3,02 > 0,60	2,17 > 0,60	1,80 > 0,60	4,06 > 0,60	3,00 > 0,60
Espanha DB- HR	-	-	2,82 > 0,50	2,20 > 0,50	1,82 > 0,50	3,65 > 0,50	3,25 > 0,50
EUA ANSI/ASA S12.60	-	-	2,82 > 0,60	2,20 > 0,60	1,82 > 0,60	3,65 > 0,70	3,25 > 0,60
França Decreto de 25/04/2003	2,42 > 1,20	2,15 >1,20	2,82 > 0,80	2,20 > 0,80	1,82 > 0,80	3,65 > 1,20	3,25 > 1,20
Noruega NS 8175	-	-	3,40 > 0,58	2,42 > 0,58	1,77 > 0,52	-	-
Portugal RRAE	2,42 > 1,82	2,15 > 1,52	2,82 > 0,93	2,20 > 0,93	1,82 > 0,96	3,65 > 1,01	3,25 > 0,96
Reino Unido BB 93	2,42 > 1,00	2,15 > 1,00	2,82 > 0,80	2,20 > 0,80	1,82 > 0,80	3,65 > 0,80	3,25 > 0,80
Suécia SS 25268	2,44 > 0,60	2,13 > 0,60	3,20 > 0,60	2,36 > 0,60	1,78 > 0,60	3,65 > 0,60	3,27 > 0,60

Comparando os valores obtidos nos ensaios e aqueles determinados pela legislação dos diferentes países abordados neste trabalho, de acordo com a Tabela 4.12, constatou-se que nenhuma das salas cumpre com a legislação, com exceção daquelas que não possuem prescrição (demarcadas com “-”).

Portanto, pode-se afirmar que as salas precisam de uma reestruturação acústica para chegarem ao TR ideal. Para isso, pode-se utilizar das soluções propostas para as salas C301, J206 e Sala de Reuniões – CTC.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A acústica é um conceito ainda em desenvolvimento no Brasil, entretanto, em outros países já é um tema muito avançado e difundido. Para os ambientes de uma instituição de ensino, que atualmente é o base do desenvolvimento da sociedade, uma boa emissão e recepção dos sons é fundamental para o aprendizado. Dessa forma, é essencial o conhecimento a respeito de materiais e princípios que afetam a qualidade acústica.

O tempo de reverberação é um dos parâmetros analisados para determinar-se a qualidade acústica de um compartimento, por isso é muito importante que seja um assunto levado em conta por todos os engenheiros civis e profissionais ligados à construção civil. Além deste parâmetro, podem ser citadas a definição, a clareza, a inteligibilidade, o ruído de fundo, entre outros.

Na determinação do TR antes da construção do compartimento há fórmulas teóricas, mas também, com o desenvolvimento da tecnologia, estão surgindo *softwares* que agilizam os cálculos e têm a função de trazer uma maior precisão. Ainda assim, é necessária a confirmação dos dados depois da obra estar finalizada por meio de ensaios, como aqueles que foram desenvolvidos nesse estudo.

Inicialmente, este trabalho buscou trazer um dos parâmetros da qualidade acústica para as salas do ISEP – o tempo de reverberação – como fator de avaliação preliminar. A avaliação de tal parâmetro foi feita comparando os valores reais (ensaiados) com aqueles calculados pela Fórmula de Sabine, método escolhido para a determinação dos TRs teóricos nesta composição. Também houve o cuidado de desenvolver a percepção tanto do autor quanto do leitor sobre a sensibilidade das variáveis cotidianas sobre o TR de um ambiente, como foi o caso dos estados das janelas, estores e afins. Para finalizar, foi dado um panorama geral da situação relativa ao TR e, conseqüentemente, da qualidade acústica das salas da instituição.

Após a elaboração deste trabalho, foi possível perceber que os materiais estudados são semelhantes, ou seja, é possível utilizar dos mesmos elementos no Brasil e em Portugal e chegar a absorções aproximadas. Também se notou que a legislação espanhola é a mais rígida, ao contrário da portuguesa.

Os resultados mostraram que, em relação aos TRs calculados, os coeficientes de absorção sonora têm um impacto muito grande no valor final. Como não há um leque de opções muito grande na literatura no que tange a escolha de materiais e móveis, é de grande valia a caracterização de revestimentos, materiais –

juntamente com suas técnicas – e móveis para constar em seus catálogos técnicos e nos memoriais descritivos com a finalidade ficar registrada essa informação para os estudos necessários.

Também foi observado o quanto as grelhas em baixo dos degraus se mostram positivas para a redução do TR, tendo dado uma diferença final de 0,89 segundos e, neste caso, atuando principalmente nas frequências de 250 Hz e 500 Hz. Entretanto, tais grelhas são simples, implicando que se fosse colocado um material absorvente dentro dos degraus a efetividade e o TR seria muito melhor. Outro fator interessante foi como a presença de pessoas dentro de um ambiente atuou positivamente no valor do TR, o que se leva a afirmar que quanto mais pessoas dentro de uma sala melhor sua acústica, além de que durante a estação mais fria, devido o uso de uma maior quantidade de tecidos absorventes, esse valor diminui ainda mais.

Por fim, foi possível concluir que, das sete salas estudadas, a que apresentou a melhor qualidade acústica – baseada no TR – foi a sala I201 (1,77 s) que possui um tratamento acústico e a de pior desempenho foi a sala J206 (3,47 s). Contudo, nenhuma destas salas se enquadrou dentro dos parâmetros estabelecidos pela legislação portuguesa ou daquelas utilizadas pelos demais países presentes neste estudo. Sendo assim, todas as salas necessitariam de uma revisão no que diz respeito a materiais de revestimento e sistemas acústicos.

5.1 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como sugestão para desenvolvimentos futuros, tem-se:

Realizar outros ensaios (inteligibilidade, clareza, entre outros) para a determinação da qualidade acústica das salas;

- Utilizar diferentes *softwares* para a determinação dos TRs, como ODEON, CATT-Acoustics, entre outros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACÚSTICA MÉDICA – Como Funciona o Ouvido [Em linha]. [Consult. 15 Fev. 2017]. Disponível na <http://acusticamedica.pt/index.php/como-funciona-o-ouvido>
- ALIBABA – Lã de fibra de vidro [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <https://portuguese.alibaba.com/p-detail/other-heat-insulation-building-construction-fiberglass-wool-material-60202092596.html>
- AMORIN, Adriana; LICARIÃO, Carolina – Introdução ao Conforto Acústico [Em linha]. Campinas: e-Labora, 2005. [Consult. 12 Fev. 2017]. Disponível na <https://dc2d101b-a-62cb3a1a-sites.googlegroups.com/site/oficinadotiao/educacao-ambiental/arquivos/Confortoacustico.pdf>
- ANJOS, Talita A. – Tempo de reverberação. [Em linha]. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/tempo-reverberacao.htm>
- ANSI – *Speech Intelligibility Index* [Em linha]. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na <https://ansidotorg.blogspot.pt/2016/06/speech-intelligibility-index.html#gref>
- ANSI S12.60-2002 – *American National Standard Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools*, 2002.
- ANTUNES, Tiago E. P. – Avaliação da Qualidade Acústica em Edifícios. Covilhã: Universidade da Beira Interior, 2013. Dissertação de Mestrado. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na https://ubibliorum.ubi.pt/bitstream/10400.6/3448/1/Dissertacao_Tiago_Antunes_M3734_Total_18_10_2013.pdf
- BASTOS, Leonardo J. R. – Qualidade Acústica de Auditórios. Aveiro: Universidade de Aveiro, 2010. Dissertação de Mestrado. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na <http://ria.ua.pt/bitstream/10773/3848/1/4393.pdf>
- BB93, *Acoustic Design of Schools: Building Bulletin 93*, 2003.
- BERTOLI, Andressa R.; Destri, Kéli C.; GELAIN, Vanessa E. – Tempo de Reverberação. Itajaí: Universidade do Vale do Itajaí, 2012. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na <https://pt.scribd.com/document/309712720/TEMPO-DE-REVERBERACAO>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIES, D.A.; HANSEN, C.H. – *Engineering Noise Control*. Londres: University of Adelaide, 1996, 615p.
- BISTAFA, Sylvio R. – *Acústica Aplicada ao Controle do Ruído*. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. ISBN 85-212-0376-4.
- BRÜEL & KJAER – 2260 Manual de Utilização: Software de Análise Sonora BZ 7201, 1994. 105 p.
- CARVALHO, Teresa – *Comportamento Acústico dos Edifícios – Física das Construções – 4º ano – Lic. Eng. Civil ISEP, Porto, 2003.*
- CEBOLA, Edson – Fenômenos Ondulatórios [Em linha]. [Consult. 12 Fev. 2017]. Disponível na <http://www.pascal.com.br/anexo/energia-fsc-B-extensivo-aulas27.pdf>
- NELSON, Peggy B.; SOLI, Sigfrid D.; SELTZ, Anne – *Acoustical Barriers to Learning. Technical Committee on Architecture of the Acoust. Soc. of Am.*, 2002. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na <http://asa.aip.org/classroom/bookletII.pdf>
- COSTA, Ana C. Q. – *Conforto Acústico em Salas de Aula Climatizadas*. Faro: Instituto Superior de Engenharia da Universidade do Algarve, 2014. Dissertação de Mestrado.
- CYSNE, Luiz F. O. – *A nova Bíblia do Som*. São Paulo: Cia do Ebook, 2016. ISBN 978-855-5850-44-8 [Consult. 13 Mar. 2017]. Disponível na https://books.google.pt/books?id=vIV0DQAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-PT&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- DIN 18041:2004-05 – *Hörsamkeit von kleinen und mittleren Räumen*, Beuth Verlag GmbH, 2004.
- DOCUMENTO BÁSICO HR. 2009, *Acústica – Protección frente al ruido*. Ministérios de Vivienda, Espanha, Update of Septiembre.
- Dofsa – cortiPAN [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.dofsa.pt/cortipan/>
- DONOSO, José P. – *Som e Acústica*. São Carlos: Universidade de São Paulo. Notas de Aula. [Consult. 07 Abr. 2017]. Disponível na <http://www.gradadm.ifsc.usp.br/dados/20122/FFI0210-1/Acustica%20de%20Salas.pdf>
- FASOLD, Wolfgang; VERES, Eva – *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis. Planungsbeispiele und konstruktive ösungen*. Berlin: Huss – Medien, 2003.
- FERREIRA, Martins – *Catálogo de Soluções Acústicas* [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na https://www.martinsferreira.pt/ficheiros/catalogo_solucoes_acusticas_flex2000_maio2012.pdf
- FITZROY, D. – *Reverberation formula which seems to be more accurate with non-uniform distribution*. Proc. Autumn Meet. Acoustuc. Soc. Jnp, p. 707-708 (1989).

- GECAD – Grupo de Investigação em Engenharia e Computação Inteligente para a Inovação e o Desenvolvimento – *How to research GECAD by subway* [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.gecad.isep.ipp.pt/GECAD/Pages/Institution/InstitutionInfoTopic.aspx?id=3>
- HALLIDAY, David et al. – Fundamentos de física: gravitação, ondas e termodinâmica. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. ISBN 978-85-216-1606-1. Vol. 2.
- IAZZETTA, Fernando – Comprimento de Onda [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na http://www.dmu.uem.br/aulas/tecnologia/TutorialAcustica_lazzetta/acustica/comprimento/comprim.html
- IAZZETTA, Fernando – Decibel [Em linha]. [Consult. 13 Fev. 2017]. Disponível na <http://www2.eca.usp.br/prof/iazzetta/tutor/>
- ISO 2204 – *Guide to Measurement of Airborne Acoustical Noise and Evaluation of its Effects on Man*, 1973.
- ISOVER – Climatização: Isolamento Técnico [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.almonda.net/microsites/anexos/as43r271prd619.pdf>
- JÚNIOR, Joab S. da S – Ondas Sonoras [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://brasilecola.uol.com.br/fisica/ondas-sonoras.htm>
- KIM, Yang-Hann – *Sound Propagation: Na Impedance Based Approach*. John Wiley & Sons, 2010. ISBN 978-0-470-82583-9. [Consult. 23 Mar. 2017]. Disponível na https://books.google.pt/books?id=I9hth416fO4C&printsec=frontcover&dq=SOUND+PROPAGATION&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKewirzOSmje_SAhUJORQKHavOCq8Q6AEIGzAA#v=onepage&q=SOUND%20PROPAGATION&f=false
- KNECHT, H. A. et al – *Background noise levels and reverberation times in unoccupied classrooms: predictions and measurements*. Am. J. Audiol., v. 11, n. 2, p. 65-71, dec. 2002.
- KUTTRUFF, Henrich – *Room Acoustics*. Aachen: Spon Press, 2009. ISBN 0-203-87637-7.
- LACAM – Laboratório de Controle Ambiental – Coeficientes de Absorção Sonora. Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília [Em linha]. [Consult. 30 Mai. 2017]. Disponível na <https://www.passeidireto.com/arquivo/4852187/tabela-de-coeficientes-de-absorcao-sonora>
- LogAcústica – Coeficientes de Absorção Sonora [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- LÓPEZ, Manuel R. – *Acústica Arquitectónica Aplicada*. Madrid: Paranifo, 1999. ISBN 84-283-2571-5.
- LOPEZ, Manuel R.; GONZALEZ Constantino G. – *Acustica Arquitectonica*. 2ª ed. Madrid: Benzal, 1993. ISBN 84-604-0285-1.
- MACHADO, Nuno – *Aulas de Física e Química: O Espectro Sonoro* [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na http://www.aulas-fisica-quimica.com/8f_07.html
- MANNIS, José A. – *Design de Difusores Sonoros a partir de Processo Serial: Adequação Acústica de Pequenas Salas à Performance e Audição Musical*. 2008. 399 p. Tese (Doutorado em Música) – Instituto de Artes, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
- MICHALSKI, Ranny L. X. N. – *Absorção sonora* [Em linha]. [Consult. 13 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.fau.usp.br/arquivos/disciplinas/au/aut0135/05%20-%20Absor%C3%A7%C3%A3o.pdf>
- MIYARA, Federio – *Nível de Ruído* [Em linha]. [Consult. 13 Fev. 2017]. Disponível na <https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm>
- NBN S 01-401 – *Acoustique: Valeurs limits des niveaux de bruit en vue d'éviter l'inconfort dnas les bâtiments*, 1987.
- NBR 10151: *Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade – Procedimento*. Rio de Janeiro, 2000. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- NBR 10152: *Níveis de Ruído para Conforto Acústico – Procedimento*. Rio de Janeiro, 1987. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- NBR 12179: *Tratamento Acústico em Recintos Fechados – Procedimento*. Rio de Janeiro, 1992. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- NBR 15575: *Edificações Habitacionais – Desempenho*. Rio de Janeiro, 2013. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- NBR 16313: *Acústica – Terminologia*. Rio de Janeiro, 2014. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.
- NEOTÉRMICA – *Lã de Vidro* [Em linha]. [Consult. 13 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.neotermica.com.br/html/isolante-termico/la-vidro/la-de-vidro-branca-sao-paulo.html>
- NP EN ISO 3382 – *Acústica: Medição de parâmetros de acústica de salas – Parte 2: Tempo de reverberação em salas correntes*, 2011, 26 p.
- OWA – *Soluções Acústicas para Escolas* [Em linha]. [Consult. 12 Mar. 2017]. Disponível na http://www.owa.com.br/assets/files/Catalogos/DS_9933_pt_BR_041500.pdf

- PATRÍCIO, Jorge V. – Acústica nos Edifícios. 5ª ed. Lisboa: Verlarg Dashöfer, 2008. ISBN 978-972-8906-55-9.
- PATRÍCIO, Jorge V. – Isolamento Sonoro a Sons Aéreos e de Percussão: metodologias de caracterização. Lisboa: ICT, 2002.
- PRADO, Cristine – Aprenda a Tocar: Órgão e Teclado. Rio de Janeiro: Irmãos Vitale, 1990. ISBN 978-85-85188-48-1. [Consult. 24 Mar. 2017]. Disponível na https://books.google.pt/books?id=UCwa8ckic_AC&pg=PA13&dq=DURA%C3%87%C3%83O+do+so+m&hl=pt-BR&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=DURA%C3%87%C3%83O%20do%20som&f=false
- PROACÚSTICA – Normas sobre desempenho acústico conforme ABNT [Em linha]. [Consult. 28 Fev. 2017]. Disponível na <http://www.proacustica.org.br/tecnico/normas-sobre-desempenho-acustico-conforme-a-abnt.html>
- REIS, Fábio d. – Rede Wireless: Ondas Eletromagnéticas [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.bosontreinamentos.com.br/redes-wireless/introducao-as-redes-sem-fio-wireless/>
- RGR – Regulamento Geral do Ruído – Decreto- Lei n.º 9/2007, de 17 de janeiro.
- ROCHA, Silvânia P. F. – Influência do Tempo de Reverberação no Isolamento Sonoro entre Espaços. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2014. Dissertação de mestrado.
- RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios – Decreto-lei no 96/2008, de 9 de Junho.
- SENAI – Instalador de som e acessórios eletroeletrônicos automotivos. São Paulo: SENAI-SP Editora, 2014. ISBN 978-85-8393-324-3. [Consult. 23 Mar. 2017]. Disponível na https://books.google.pt/books?id=A3EUDAAAQBAJ&pg=PA91&dq=Instalador+de+som+e+access%C3%B3rios+eletroeletr%C3%B4nicos+automotivos&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwjll-Ije_SAhVHVhQKHxGkBo0Q6AEIGzAA#v=onepage&q=Instalador%20de%20som%20e%20access%C3%B3rios%20eletroeletr%C3%B4nicos%20automotivos&f=false
- SILVA, Carlos M. F. – O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013. Dissertação de Mestrado.
- SILVA, Domiciano C. M. – Refração de Ondas [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/fisica/refracao-ondas.htm>
- SILVA, Pedro M. da – Acústica de Edifícios. 7ª ed. Lisboa: LNEC, 2003. ISBN 972-49-0013-4.
- SILVA, Pedro M. da – Engenharia Acústica. Lisboa: Ordem dos Engenheiros, 2007. ISBN 978-972-98843-9-9.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SIMÕES, Flávio Maia – Catálogo: Acústica Arquitetônica [Em linha]. [Consult. 12 Fev. 2017]. Disponível na <https://ambeefau.files.wordpress.com/2011/09/acustica.pdf>
- SÓ BIOLOGIA – Poluição Sonora [Em linha]. [Consult. 15 Fev. 2017]. Disponível na <http://www.sobiologia.com.br/conteudos/Corpo/sentido4.php>
- SOM E ACÚSTICA – Absorção Acústica [Em linha]. [Consult. 20 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.someacustica.com/>
- SOTECNISOL – Produtos [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.sotecnisol.pt/>
- SOUZA, Léa C. L.; ALMEIDA, Manuela G.; BRAGANÇA Luís – Bê-á-bá da Acústica Arquitetônica. São Carlos: EdUFSCAR, 2012. ISBN 978-7600-073-0.
- SS 2526 – *Byggakustik: Ljudklassning av utrymmen i byggnader – Vårdlokaler, undervisningslokaler, dag- och fritidshem, kontor och hotel*, 2007.
- Super Acústica – Produtos [Em linha]. [Consult. 13 Mar. 2017]. Disponível na <http://www.superacustica.com.br/index2.html>
- UALG – Universidade do Algarve – Ondas Sonoras [Em linha]. [Consult. 15 Fev. 2017]. Disponível na <http://w3.ualg.pt/~rguerra/Acustica/som.pdf>
- UNESP – Universidade Estadual Paulista – Acústica e Ruídos [Em linha]. [Consult. 15 Fev. 2017]. Disponível na <http://www.feb.unesp.br/jcandido/acustica/Apostila/Capitulo%2002.pdf>
- UNIME – Università degli Studi Messina – Ondas [Em linha]. [Consult. 21 Mar. 2017]. Disponível na <http://ww2.unime.it/weblab/awardarchivio/ondulatoria/ondas.htm>
- VIEIRA, Ivone L. – *Audiologia Clínica: Ruído e Perda Auditiva*. Recife: Centro de Especialização em Fonoaudiologia Clínica, 1999. [Consult. 07 Abr. 2017]. Disponível na <http://www.cefac.br/library/teses/1565f80d879b2ef53634d25e0a4f29f7.pdf>
- VÖRLANDER, M. – *Auralization: fundamentals of acoustics, modelling, simulation, algorithms and acoustic virtual reality first edition*. Berlim: Springer-Verlag, 2008. ISBN 978-3-540-48829-3. [Consult. 02 Abr. 2017]. Disponível na https://books.google.pt/books?id=CuXF3JkTuhAC&pg=PR4&dq=Auralization:+fundamentals+of+a+coustics,+modelling,+simulation,+algorithms+and+acoustic+virtual+reality+first+edition&hl=pt-PT&sa=X&ved=0ahUKEwiq_PDTrYbTAhUCbSYKHRciC2UQ6AEIGzAA#v=onepage&q&f=false
- ZANNIN, Paulo H. T. et al. N.º 4. (out./dez. 2005) – Porto Alegre: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2005. ISSN 1415-8876.

ANEXO I – PLANTAS DE REVESTIMENTOS DAS SALAS ANALISADAS

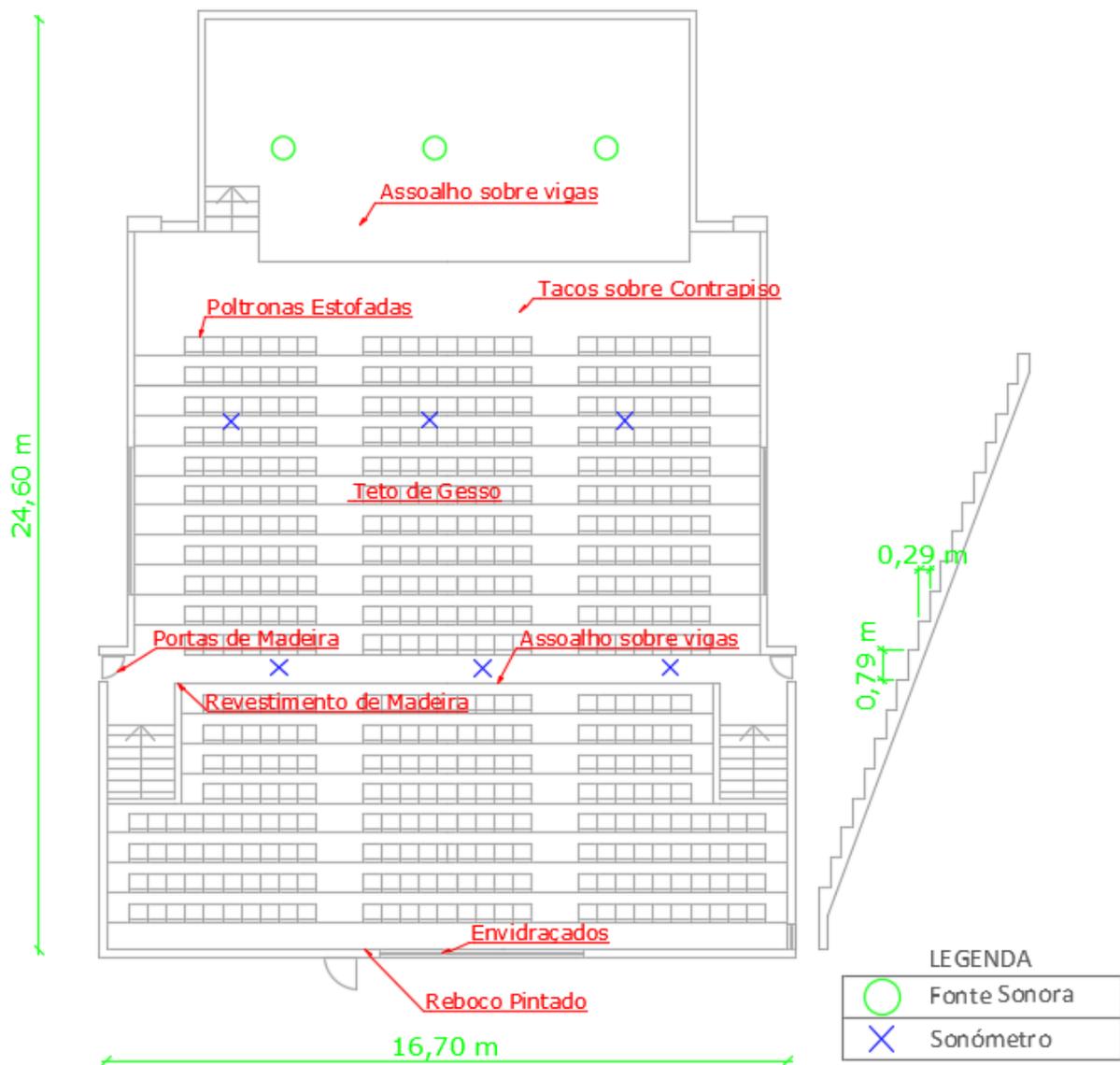


Figura A – Planta de Revestimento do Auditório Magno sem escala.

Fonte: Autoria própria.

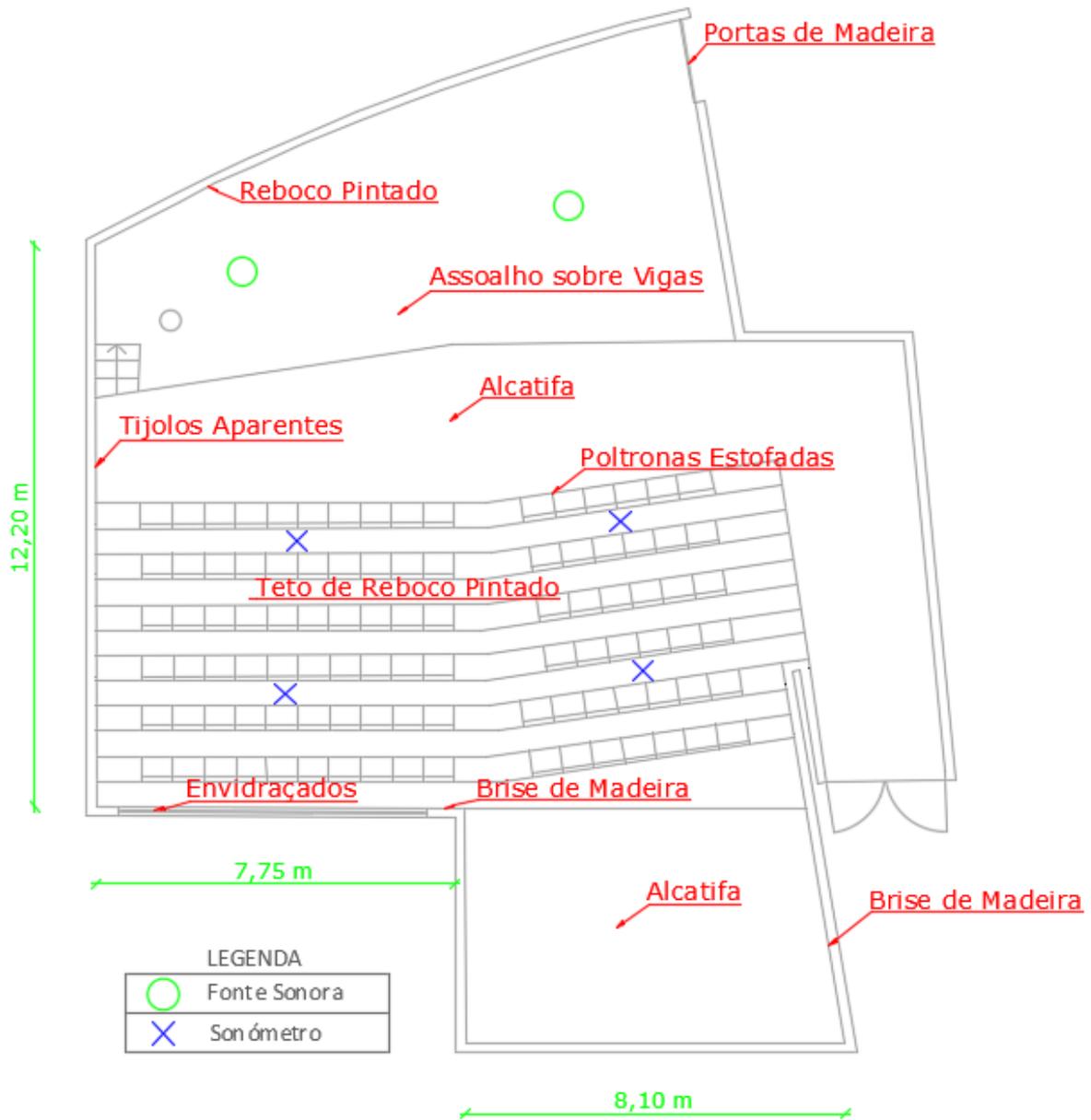


Figura B – Planta de revestimentos do Auditório E sem escala.

Fonte: Autoria própria.

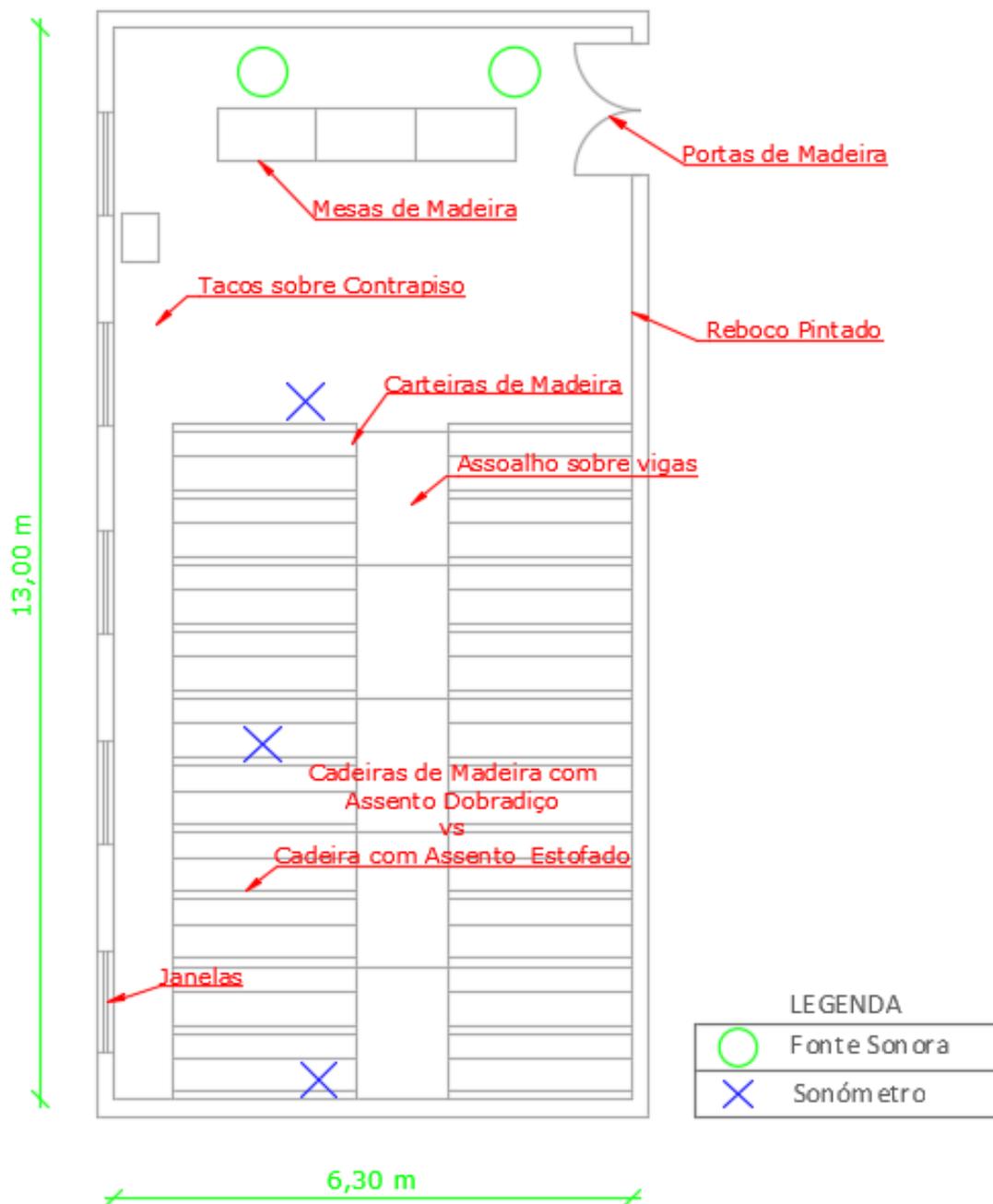


Figura C – Planta de revestimentos da sala C301 sem escala.

Fonte: Autoria Própria.

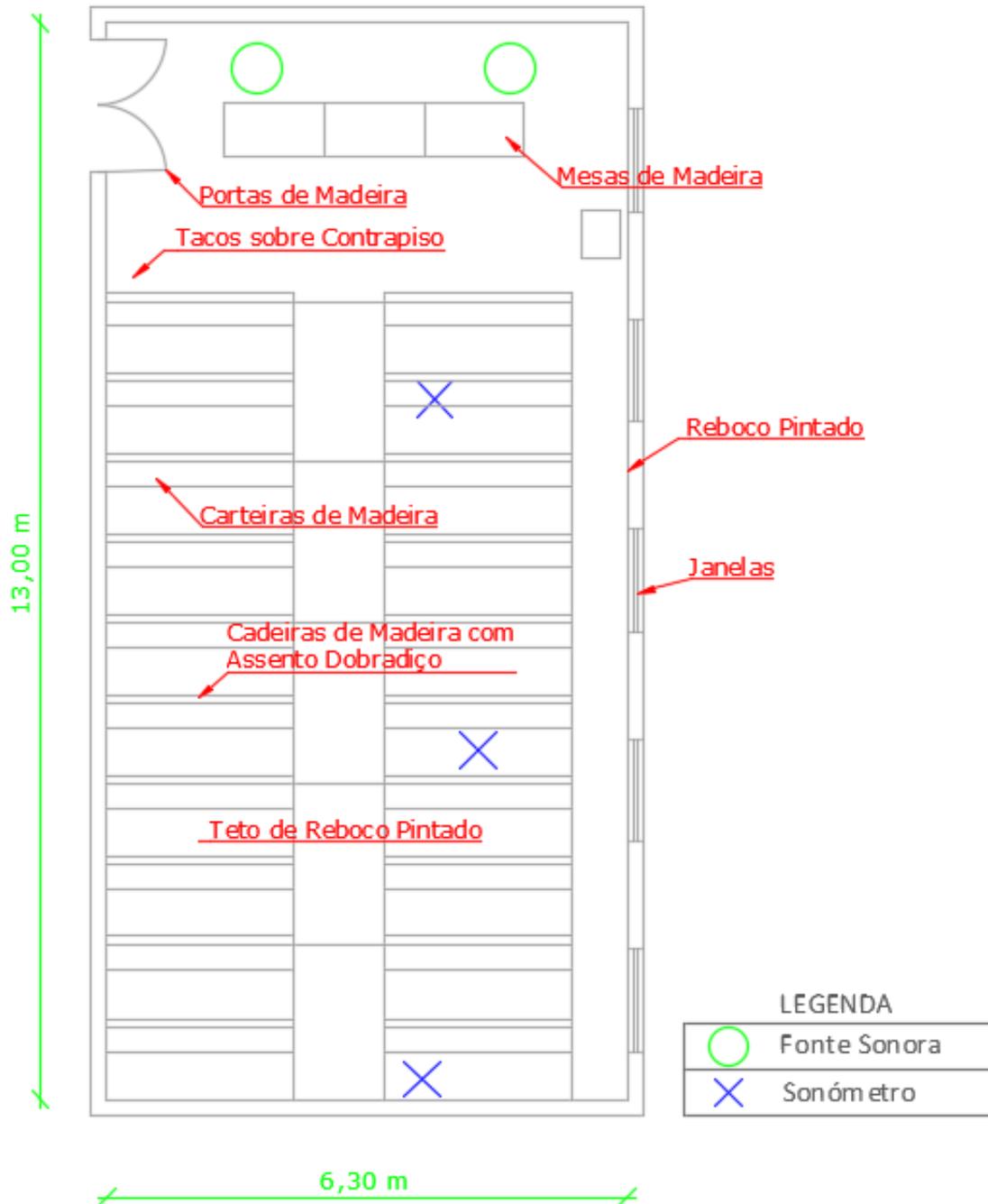


Figura D – Planta de revestimentos da sala C302 sem escala.

Fonte: Autoria própria.

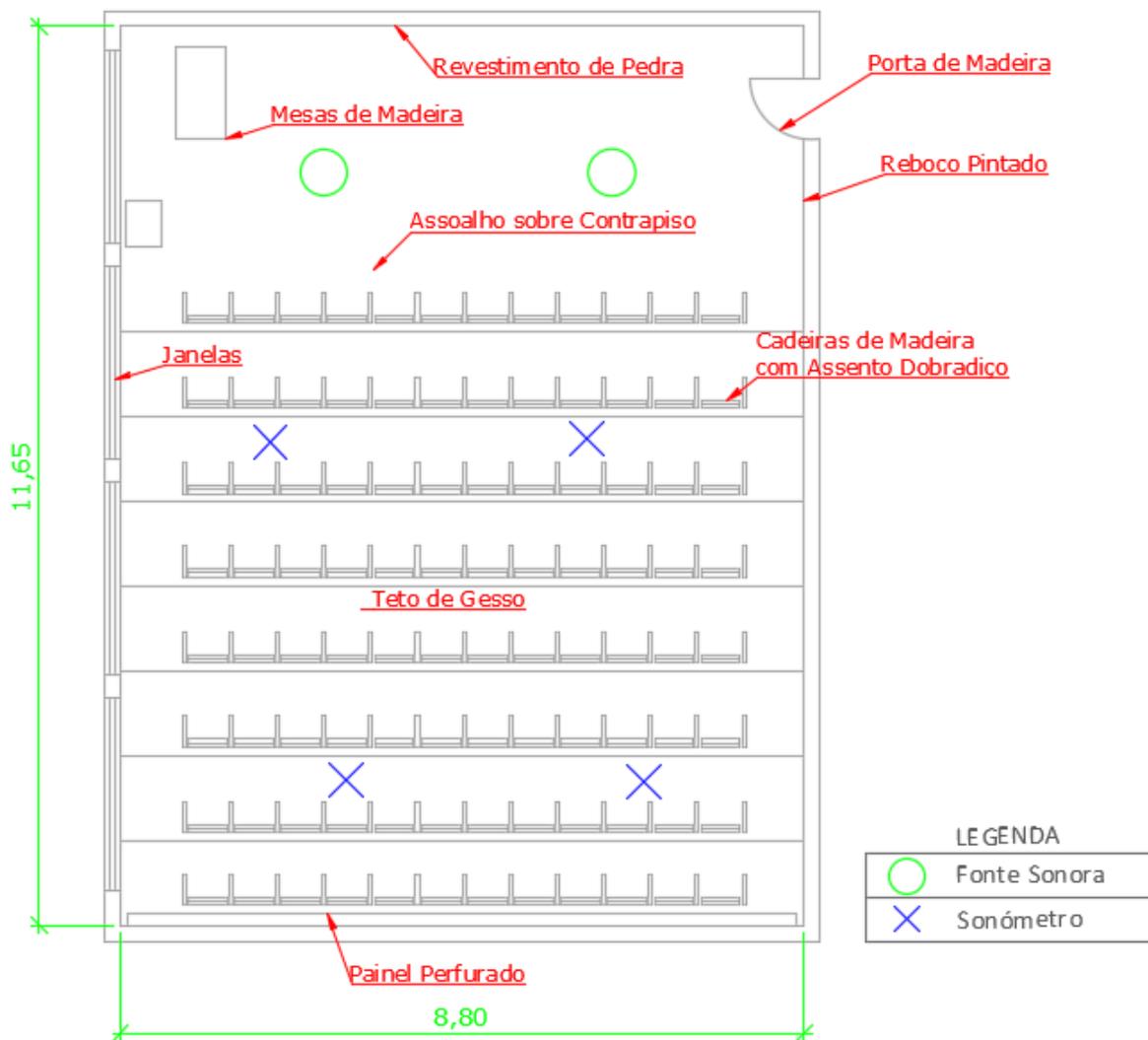


Figura E – Planta de revestimentos da sala I201 sem escala.

Fonte: Autoria própria.



Figura F – Planta de revestimentos da sala J206 sem escala.

Fonte: Autoria própria.

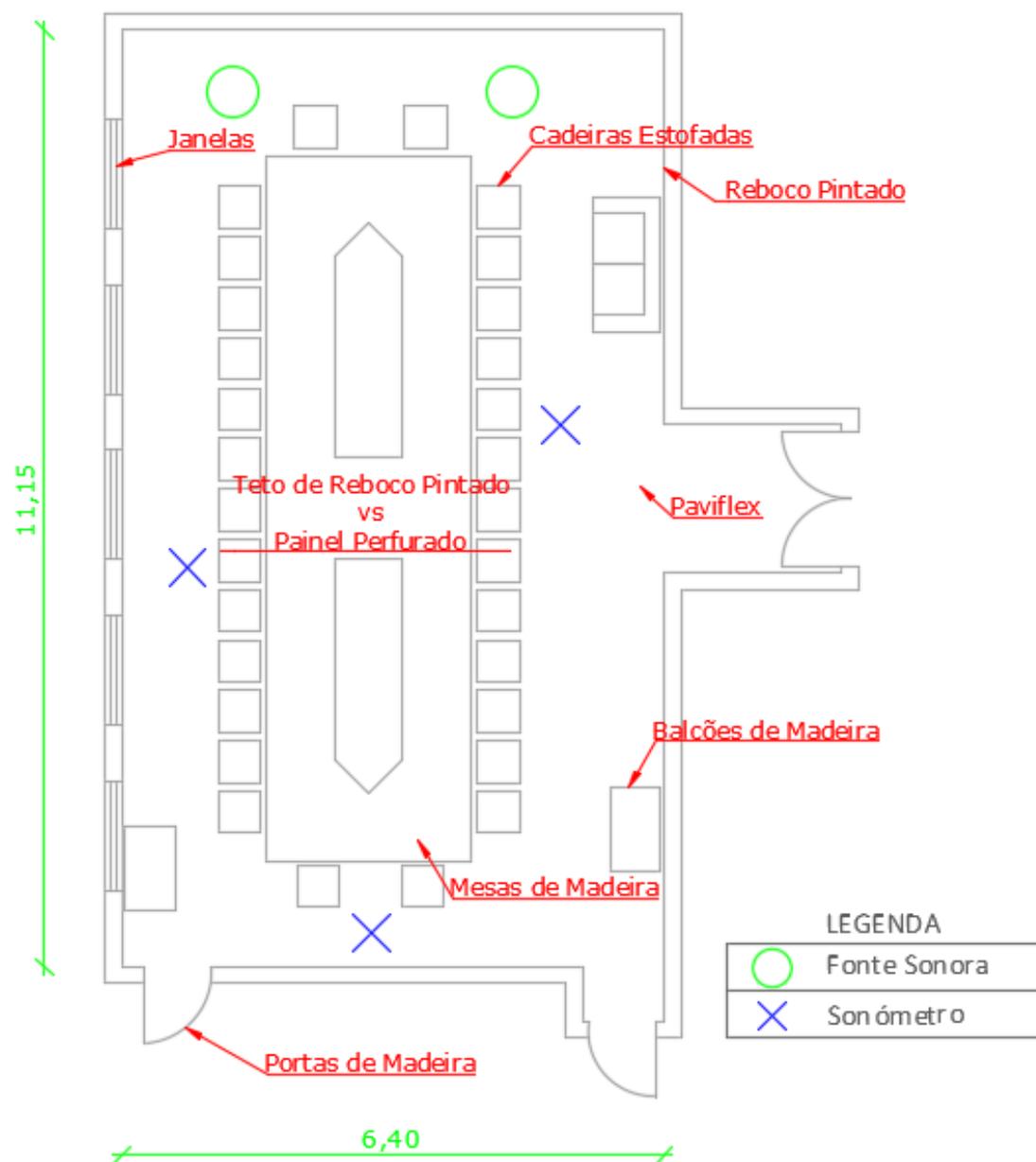


Figura G – Planta de Revestimento da Sala de Reuniões – CTC sem escala.

Fonte: Autoria própria.

ANEXO II – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO TEÓRICOS

Tabela A – TR teórico do Auditório Magno | Anexo I | Figura A.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Poltronas	450 un.	0,10	-	0,35	-	0,50	-	0,32
Teto de gesso	435 m ²	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,11
Janelas	18 m ²	0,28	-	0,01	0,015	0,02	-	0,08
Portas de madeira	10 m ²	0,09	-	0,08	0,09	0,10	-	0,09
Cortinas	110 m ²	0,12	0,28	0,44	0,42	0,4	0,40	0,34
Piso de madeira sobre vigas	146 m ²	0,15	0,11	0,1	0,07	0,06	0,07	0,09
Piso de madeira	393 m ²	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
Paredes de reboco pintado	269 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Painéis de madeira	47 m ²	0,04	-	0,03	0,03	0,03	-	0,03
Piano de cauda	1 un.	0,20	0,40	0,60	0,56	0,52	0,52	0,47
Pessoa	1 un.	0,09	0,18	0,19	0,17	0,06	0,05	0,12
	Sabine	1,25	2,65	1,11	3,08	0,88	2,71	1,95

Fonte: Autoria própria.

Tabela B – TR teórico do Auditório E | Anexo I | Figura B.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Poltronas	188 un.	0,10	-	0,35	-	0,50	-	0,32
Piso de alcatifa	271,15 m ²	0,05	0,10	0,15	0,30	0,50	0,55	0,28
Piso de madeira	96,58 m ²	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
Portas de madeira	12,92 m ²	0,09	-	0,08	0,09	0,10	-	0,09
Janelas	4,06 m ²	0,28	-	0,01	0,02	0,02	-	0,08
Brisas	72,15 m ²	0,08	-	0,06	0,06	0,06	-	0,07
Tijolo maciço	71,81 m ²	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,07	0,04
Teto de reboco pintado	72,71 m ²	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,11
Teto de alvenaria ou gesso	176,29 m ²	0,04	-	0,03	-	0,02	-	0,03
Paredes de reboco pintado	122,30 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Pessoa	1 un.	0,09	0,18	0,19	0,17	0,06	0,05	0,12
	Sabine	2,15	3,91	1,27	1,66	0,65	0,99	1,77

Fonte: Autoria própria.

Tabela C – TR teórico da sala C301 | Anexo I | Figura C.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Cadeiras	117 un.	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03
Carteiras	17,71 m ²	0,05	-	0,03	0,03	0,03	-	0,04
Janelas	13,81 m ²	0,28	-	0,01	0,02	0,02	-	0,08
Mesas de madeira	2,61 m ²	0,28	-	0,01	0,02	0,02	-	0,08
Porta de madeira	3,13 m ²	0,09	-	0,08	0,09	0,10	-	0,09
Cadeira de couro sintético	1,00 m ²	0,13	0,14	0,15	0,12	0,07	-	0,12
Cadeira estofada	1,00 m ²	0,41	0,50	0,56	0,58	0,45	-	0,50
Tacos sobre contrapiso	36,66 m ²	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
Piso de madeira sobre vigas	50,92 m ²	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,09
Parede de reboco pintado	94,86 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Teto de reboco pintado	81,76 m ²	0,04	-	0,03	-	0,02	-	0,03
Pessoa	1 un.	0,09	0,18	0,19	0,17	0,06	0,05	0,12
	Sabine	1,82	3,40	2,58	2,89	2,69	3,48	2,81

Fonte: Autoria própria.

Tabela D – TR teórico da sala C302 | Anexo I | Figura D.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Cadeiras	117 un.	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03
Carteiras	17,71 m ²	0,05	-	0,03	0,03	0,03	-	0,04
Janelas	13,81 m ²	0,28	-	0,01	0,02	0,02	-	0,08
Mesas de madeira	2,75 m ²	0,28	-	0,01	0,02	0,02	-	0,08
Porta de madeira	3,13 m ²	0,09	-	0,08	0,09	0,10	-	0,09
Cadeira de couro sintético	1,00 m ²	0,13	0,14	0,15	0,12	0,07	-	0,12
Cadeira estofada	1,00 m ²	0,41	0,50	0,56	0,58	0,45	-	0,50
Tacos sobre contrapiso	25,59 m ²	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03
Piso de madeira sobre vigas	59,92 m ²	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,09
Parede de reboco pintado	95,16 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Teto de reboco pintado	81,80 m ²	0,04	-	0,03	-	0,02	-	0,03
Grelha	14,40 m ²	0,30	-	0,50	-	0,50	-	0,43
Pessoa	1 un.	0,09	0,18	0,19	0,17	0,06	0,05	0,12
	Sabine	1,49	3,36	1,74	2,92	1,81	3,44	2,46

Fonte: Autoria própria.

Tabela E – TR teórico da sala I201 | Anexo I | Figura E.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Cadeiras	104 un.	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03
Janelas	11,01 m ²	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,17
Mesas de madeira	1,28 m ²	0,05	-	0,03	0,03	0,03	-	0,04
Porta de madeira	2,13 m ²	0,14	-	0,06	-	0,10	-	0,10
Cadeira de couro sintético	1,00 m ²	0,13	0,14	0,15	0,12	0,07	-	0,12
Tacos sobre contrapiso	107,40 m ²	0,04	-	0,03	0,03	0,03	-	0,03
Paredes de reboco pintado	37,81 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Painel Furado	19,30 m ²	0,42	0,91	0,69	0,61	0,26	0,28	0,53
Pedra	21,19 m ²	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01
Teto de gesso	101,88 m ²	0,29	0,10	0,05	0,04	0,07	0,09	0,11
Pessoa	1 un.	0,18	0,32	0,43	0,41	0,45	0,36	0,36
	Sabine	0,89	1,28	1,57	1,64	1,93	2,07	1,56

Fonte: Autoria própria.

Tabela F – TR teórico da sala J206 | Anexo I | Figura F.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Carteiras de madeiras	55 un.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,08	0,05	0,06
Cadeiras de madeira	53 un.	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,04	0,03
Cadeira estofada	1 un.	0,41	0,50	0,56	0,58	0,45	-	0,50
Janelas envidraçadas	20,43 m ²	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,17
Porta de madeira	2,13 m ²	0,14	-	0,06	-	0,10	-	0,10
Teto de reboco pintado	88,50 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Tacos sobre contrapiso	81,44 m ²	0,04	-	0,03	0,03	0,03	-	0,03
Assoalho sobre vigas	7,06 m ²	0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07	0,09
Paredes de reboco pintado	110,61 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Pessoa	1 un.	0,18	0,32	0,43	0,41	0,45	0,36	0,36
	Sabine	2,79	3,93	3,12	3,23	3,09	4,67	3,47

Fonte: Autoria própria.

Tabela G – TR teórico da sala de reuniões – CTC | Anexo I | Figura G.

	Quantidade	Frequências						Absorção Média
		125	250	500	1000	2000	4000	
Cadeiras estofadas	29 un.	0,20	0,20	0,25	0,30	0,30	0,30	0,26
Sofá	2 lug.	0,28	0,28	0,28	0,28	0,34	0,34	0,30
Balcões de madeira	6,24 m ²	0,05	-	0,03	0,03	0,03	-	0,04
Janelas	13,49 m ²	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04	0,17
Portas de madeira	7,10 m ²	0,14	-	0,06	-	0,10	-	0,10
Piso de Paviflex	75,68 m ²	0,04	-	0,03	-	0,03	-	0,03
Teto de reboco pintado	81,92 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Paredes de reboco pintado	96,71 m ²	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Pessoa	1 un.	0,18	0,32	0,43	0,41	0,45	0,36	0,36
	Sabine	2,42	3,55	2,46	2,79	2,40	3,04	2,78

Fonte: Autoria própria.