

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

**Medição e Adequação dos Parâmetros
Acústicos em Salas de Aula e de Recitais**

Campina Grande, PB

2016

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Medição e Adequação dos Parâmetros Acústicos em Salas de Aula e de Recitais

Trabalho monográfico acadêmico apresentado como nota final da disciplina Projeto de Engenharia Elétrica.

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Departamento de Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. José Ewerton Pombo de Farias

Campina Grande, PB

2016

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Medição e Adequação dos Parâmetros Acústicos em Salas de Aula e de Recitais/ Lucas Cavalcanti Lins Falcão. – Campina Grande, PB, 2016-

93 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Dr. José Ewerton Pombo de Farias

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) – Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica, 2016.

1. Acústica Arquitetônica. 2. Inteligibilidade. 2. Acústica de Auditórios. I. Dr. José Ewerton Pombo de Farias. II. Universidade Federal de Campina Grande. III. Engenharia Elétrica. IV. Medição e Adequação dos Parâmetros Acústicos em Salas da UFCG

Lucas Cavalcanti Lins Falcão

Medição e Adequação dos Parâmetros Acústicos em Salas de Aula e de Recitais

Trabalho monográfico acadêmico apresentado como nota final da disciplina Projeto de Engenharia Elétrica.

Dr. José Ewerton Pombo de Farias
Orientador

Professor
Convidado 1

Campina Grande, PB
2016

*Este trabalho é uma homenagem a todos que lutam diariamente por seus sonhos
e nunca desistiram.*

Agradecimentos

Primeiramente e o mais importante, um agradecimento especial aos meus pais, Saulo e Áurea, que mesmo em tempos difíceis, sempre lutaram para me ver formado e atingindo todos os meus objetivos até mesmo quando o caminho parecia incerto. Muito obrigado pela vida que eu tenho.

Aos meus tios, João, Alzira e Bernadete, muito obrigado por toda a ajuda que recebi de vocês durante toda a graduação. Vocês sempre terão meu eterno agradecimento.

Aos meus irmãos, Sarah e Daniel, muito obrigado por fazerem parte da minha vida. Mesmo que talvez não saibam, vocês sempre foram um exemplo e fonte de boas energias na minha vida.

Ao professor José Ewerton, muito obrigado pela sua paciência, parceria, ensinamentos e, acima de tudo, obrigado pela força. Sem seus ensinamentos e sua ajuda nada disso estaria sendo possível. Este trabalho e tudo mais que ainda está por vir tem influência direta sua.

Aos eternos amigos, Nicolas, Iandê, João e Fernando, a presença e companhia de vocês foi fundamental nisso tudo. Obrigado pela convivência e principalmente pela presença de vocês nessa caminhada e na minha vida.

A todos os outros amigos, colegas e familiares, muito obrigado por existirem. Que nossos caminhos continuem a se cruzar aqui e sempre.

Toda a análise e processamento dos dados só foi possível graças a equipe do Instituto Técnico de Acústica da universidade de Aachen que desenvolveu o ITA-Toolbox para MATLAB.

*“A lei de ouro do comportamento é a tolerância mútua,
já que nunca pensaremos todos da mesma maneira,
já que nunca veremos senão uma parte da verdade e sob ângulos diversos.
(Mahatma Gandhi)*

Resumo

Este trabalho apresenta medidas dos parâmetros acústicos de duas salas localizadas no Campus de Campina Grande da UFCG. Uma das salas investigadas, sala 102 do bloco CAA, é uma sala de aulas com capacidade para 110 estudantes. A outra é um auditório situado na Unidade Acadêmica de Arte e Mídia (UAAMI-UFCG). Por meio de um procedimento experimental foram obtidos o tempo de reverberação (RT) e o tempo do decaimento inicial (EDT). Através do exame dos parâmetros medidos, foi possível extrair sugestões para as melhorias das qualidades acústicas dos dois ambientes estudados, levando-se em consideração as finalidades de usos dos mesmos.

Palavras-chave: acústica. inteligibilidade. salas de aula. auditórios. salas de concerto.

Abstract

This work reports on measurements of acoustic parameters of two rooms located at the Campina Grande Campus of the Federal University of Campina Grande (UFCG). One of the rooms investigated, labeled Room 102 of the CAA building, is a classroom with seats for 110 students. The other is an auditorium which belongs to the Media and Arts Department (UAAMI-UFCG). Reverberation time (RT) and early decay time (EDT) were obtained by means of an experimental procedure. By examining the measured parameters, suggestions concerning acoustic performance enhancement for these rooms have been drawn.

Keywords: acoustics. intelligibility. classrooms. auditoriums. concert halls.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Partes da região periférica do ouvido humano (PEREIRA et al., 2009).	30
Figura 2 – Curvas Phon propostas por Fletcher e Munson (GELFAND, 2016).	33
Figura 3 – Propagação de uma onda sonora pelo ar.	35
Figura 4 – Comportamento de uma onda sonora de tom puro e um ruído no tempo (JARUSZEWSKA et al., 2015).	36
Figura 5 – Nível de pressão sonora de ruídos típicos e suas respectivas faixas de frequência (JARUSZEWSKA et al., 2015).	38
Figura 6 – Som irradiado de uma fonte pontual (BALLOU, 2013).	39
Figura 7 – Efeito do vento na propagação do som (LONG, 2005).	40
Figura 8 – Efeito de um gradiente de temperatura na propagação do som (LONG, 2005).	40
Figura 9 – Acústica subjetiva para salas: conceitos gerais (DUNN et al., 2015).	41
Figura 10 – O som direto e suas reflexões em uma sala (DUNN et al., 2015).	43
Figura 11 – Resposta ao impulso de uma sala (EVEREST; POHLMANN, 2001).	43
Figura 12 – Influência da reverberação no nível de pressão sonora de uma sala (BOOTHROYD, 2004).	44
Figura 13 – Configuração dos modos axiais de uma sala de comprimento L (BALLOU, 2013).	45
Figura 14 – Exemplo de modos oblíquos e tangenciais em uma sala (LONG, 2005).	46
Figura 15 – Dimensões preferíveis para salas retangulares propostas por Bolt em 1946 (LONG, 2005).	47
Figura 16 – Regiões da resposta em frequência de uma sala (LONG, 2005).	48
Figura 17 – Curva de decaimento $R(t)$ e a definição de tempo de reverberação (DUNN et al., 2015).	49
Figura 18 – Tempo de reverberação sugerido para salas de acordo com seu volume e uso (LONG, 2005).	50
Figura 19 – Características temporal e espacial de absorvedores, refletores e difusores (COX; D'ANTONIO, 2009).	53
Figura 20 – Atuação de um difusor sob uma onda sonora (COX; D'ANTONIO, 2009).	54
Figura 21 – Resposta temporal e espectral de uma superfície refletiva e um difusor (COX; D'ANTONIO, 2009).	54
Figura 22 – Características de alguns tipos de ruído no domínio da frequência (ASTOLFI; BOTTALICO; BARBATO, 2012).	56
Figura 23 – Critério de Ruído: curvas desejáveis (LONG, 2005).	58
Figura 24 – A inteligibilidade em função da relação sinal-ruído (KINSLER et al., 1999).	59

Figura 25 – Espectrograma de uma frase com e sem a influência da reverberação (BOOTHROYD, 2004).	60
Figura 26 – Princípio de medição do RASTI (DUNN et al., 2015).	61
Figura 27 – Escala dos valores obtidos para o RASTI (DUNN et al., 2015).	61
Figura 28 – Reconhecimento de palavras familiares e não-familiares do tipo CVC em função do SAI e da relação sinal-ruído efetivo (BOOTHROYD, 2004).	62
Figura 29 – Projeto da estrutura física de uma sala para até 120 lugares (LONG, 2005).	64
Figura 30 – Formatos típicos de salas de concerto (LONG, 2005).	65
Figura 31 – Resposta espacial e resposta em frequência do microfone de medição ECM8000.	69
Figura 32 – Equipamentos utilizados no auditório da UAAMI.	70
Figura 33 – Equipamentos utilizados na sala de aula do CAA.	70
Figura 34 – Representação da planta da sala de aula do bloco CAA da UFCG.	72
Figura 35 – Representação da planta do auditório da UAAMI.	73
Figura 36 – Dodecaedro: fonte sonora omnidirecional composta por 12 alto falantes (KUTTRUFF, 2009).	76
Figura 37 – Diagrama da montagem dos equipamentos durante as medições.	77
Figura 38 – Retorno das reflexões da sala ao palco.	85

Lista de tabelas

Tabela 1 – Exemplos de ITD para alguns ângulos	32
Tabela 2 – Modos da sala investigada experimentalmente.	46
Tabela 3 – Coeficiente de absorção dos materiais encontrados nas salas medidas (COX; D'ANTONIO, 2009).	72
Tabela 4 – Posição das medições realizadas na sala de aula do CAA.	78
Tabela 5 – Posição das medições realizadas no auditório da UAAMI.	78
Tabela 6 – Valores obtidos na medição do EDT em segundos.	81
Tabela 7 – Valores obtidos na medição do T20 em segundos.	81
Tabela 8 – Valores obtidos na medição do T30 em segundos.	82
Tabela 9 – Valores obtidos na medição do EDT em segundos.	83
Tabela 10 – Valores obtidos na medição do T20 em segundos.	83
Tabela 11 – Valores obtidos na medição do T30 em segundos.	84

Lista de abreviaturas e siglas

Pa	Pascal
RMS	Raiz do valor médio quadrático (Root Mean Square)
dB	Decibel
SPL	Nível de Pressão Sonora
SAH	Sistema Auditivo Humano
ITD	Diferença temporal interauricular (Interaural Time Difference)
ILD	Diferença de intensidade interauricular (Interaural Level Difference)
EDT	Tempo de decaimento inicial (Early Decay Time)
RT	Tempo de reverberação (Reverberation Time)
G	Força do som (Strenght)
C	Claridade do som (Clarity)
S/N	Relação sinal-ruído
NC	Critério de ruído
STI	Índice de inteligibilidade da fala (Speech Transmission Index)
RASTI	Índice rápido de inteligibilidade da fala (Rapid Speech Transmission Index)
SAI	Índice de audibilidade da fala (Speech Audibility Index)
CVC	Consoante-vogal-consoante
LSS	Seno de varredura linear (Linear Sine Sweep)
ESS	Seno de varredura exponencial (Exponential Sine Sweep)

Lista de símbolos

f	Frequência
ω	Frequência angular
λ	Comprimento de onda
c	Velocidade do Som
T	Período
S	Área em m^2
V	Volume em m^3
p_{rms}	Pressão eficaz (RMS)
$p_{ref,rms}$	Pressão eficaz (RMS) de referência
L_p	Nível de pressão sonora em dB
W	Potência sonora medida em watts
I	Intensidade Sonora
$f_{l,m,n}$	Frequência do modo descrito pelos índices l, m, n
f_s	Frequência de Schroeder
T_{60}	Tempo de reverberação
\bar{A}	Quantidade de área absorvente em Sabins
a_E	Coefficiente de absorção de uma dada superfície

Sumário

	Introdução	25
0.1	Objetivos	25
0.2	Metodologia	25
I	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
1	O OUVIDO HUMANO	29
1.1	Região periférica	29
1.2	Localização espacial	30
1.2.1	Diferença de Intensidade Interauricular (ILD)	31
1.2.2	Diferença Temporal Interauricular (ITD)	31
1.3	<i>Loudness</i> (Volume ou altura do som)	32
2	A ONDA SONORA	35
2.1	Velocidade do som	35
2.2	Frequência	35
2.3	Pressão sonora	36
2.4	Propagação do som em espaços abertos	37
3	ACÚSTICA ARQUITETÔNICA	41
3.1	Acústica de salas - conceitos gerais e principais parâmetros	41
3.1.1	A resposta ao impulso	42
3.1.2	Modos normais de salas retangulares	44
3.1.3	Principais parâmetros acústicos	47
3.1.3.1	Tempo de reverberação (RT)	47
3.1.3.2	Early Decay Time (EDT)	51
3.1.3.3	Força do som (G)	51
3.1.3.4	Clareza (C)	51
3.2	Absorvedores	52
3.3	Difusores	52
3.4	Ruído	55
3.4.1	Tipos de transmissão de ruído	55
3.4.2	Curvas de critério de ruído	57
3.5	Inteligibilidade	57
3.6	Acústica de auditórios	62
3.7	Acústica de salas de concerto	63

II	PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	67
4	MATERIAIS UTILIZADOS	69
5	CARACTERÍSTICAS DOS AMBIENTES MEDIDOS	71
6	MEDIÇÃO DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS	75
6.1	ISO 3382	75
6.2	Varredura de seno	76
6.3	Posição das medições	78
III	RESULTADOS	79
7	SALA DE AULA (CAA)	81
7.1	Parâmetros acústicos	81
7.2	Análise dos resultados	82
8	AUDITÓRIO (UAAMI)	83
8.1	Parâmetros acústicos	83
8.2	Análise dos resultados	83
9	CONCLUSÃO	87
	REFERÊNCIAS	89
	ANEXOS	91
	ANEXO A – CÓDIGO UTILIZADO NAS MEDIÇÕES	93

Introdução

Em salas com usos específicos como salas de aula, auditórios ou salas de concerto, é extremamente importante que se tenha em mente a necessidade de um projeto acústico que torne essa sala apropriada para o seu uso final. Projetos acústicos tratam do posicionamento de refletores, absorvedores e difusores ao longo das salas de modo que a reprodução de um som seja entendido de forma apropriada e cause conforto acústico para o usuário. Em salas de aula, por exemplo, o mau planejamento do espaço pode causar desconforto no processo de aprendizagem devido à má inteligibilidade no local e, conseqüentemente, pode vir a causar um mau aproveitamento no aprendizado dos alunos em sala.

Já em salas destinadas a concertos em geral, o mau planejamento da sala pode trazer ao ouvinte um som demasiadamente seco, onde a dinâmica entre as notas é muito alta causando um certo impacto no ouvinte e uma sensação de vazio. Ou vivo demais causando dificuldade na compreensão das melodias e ausência de dinâmica na música.

Desta forma, é extremamente necessário que os engenheiros e arquitetos estejam atentos da necessidade de um bom projeto acústico e não somente da estética do local.

0.1 Objetivos

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivos:

1. Medir os parâmetros acústicos (T20, T30 e EDT) de duas salas no Campus de Campina Grande da UFCG e
2. À luz dos resultados experimentais obtidos, sugerir a aplicação de medidas corretivas com a finalidade de adequar esses ambientes às normas técnicas existentes.

0.2 Metodologia

Primeiramente, foi feita uma revisão bibliográfica buscando artigos e livros que possam ser utilizados para uma melhor execução do trabalho. Logo depois foram feitas as primeiras medições em uma das salas do novo prédio central de aulas (CAA) e, depois dessas medições, na sala destinada aos recitais dos alunos de música da Unidade Acadêmica de Arte e Mídia (UAAMI). O passo seguinte foi a análise do material adquirido e a comparação dos resultados com as normas internacionais de acústica. O último passo no trabalho foi a sugestão de modificações com base em teorias consolidadas no material bibliográfico e

ressaltou que tipos de melhorias seriam percebidas após uma possível reforma. A ordem adotada foi a seguinte:

1. Revisão bibliográfica;
2. Medições;
3. Análise;
4. Conclusão;
5. Defesa do trabalho.

Parte I

Fundamentação Teórica

1 O ouvido humano

O sistema auditivo humano, SAH, pode ser dividido em duas partes: região periférica e região central. A região periférica é o próprio ouvido humano e é responsável por codificar o som do ambiente em impulsos nervosos e mandá-los à região central que fica localizada no cérebro. Esse sistema, composto por essas duas regiões, é responsável por todo o processamento da informação acústica desde a captação até a interpretação da informação.

O SAH é capaz de responder à frequências que vão de 20 Hz a 20.000 Hz . A 1 kHz , nosso sistema é capaz de detectar deslocamentos no tímpano iguais a um décimo do diâmetro de uma molécula de hidrogênio. Além disso, o SAH juntamente com o sistema nervoso é um analisador de frequência com incrível seletividade (KINSLER et al., 1999).

1.1 Região periférica

Dentro da região periférica existem também três sub-regiões: o ouvido externo, ouvido médio e ouvido interno. No ouvido externo está contido o pavilhão auricular (orelha) e o canal auditivo que conduzem o som até o tímpano fazendo-o vibrar. Nos humanos, a orelha é um dispositivo pouco eficiente, mas em alguns animais ela desempenha um papel importante contribuindo com um ganho apreciável sobre certas frequências. O canal auditivo é um tubo aproximadamente reto com $0,8\text{ cm}$ de diâmetro e $2,8\text{ cm}$ de comprimento. A faixa de ressonância mais significativa do canal auditivo está entre as frequências de 2.000 Hz e 6.000 Hz com um pico em 3.000 Hz (KINSLER et al., 1999). Na figura 1 é possível observar a divisão da região periférica do SAH e seus componentes.

No ouvido médio estão o tímpano, a trompa de Eustáquio, a janela oval e os ossículos. O tímpano é uma membrana fina posicionada de forma perpendicular ao canal auditivo e na sua extremidade. Esta membrana é a entrada para uma cavidade de ar, de aproximadamente 2 cm^3 de volume, que contém três ossículos. O primeiro ossículo é o martelo que está diretamente conectado ao tímpano. O segundo se chama bigorna e é responsável por ligar o martelo ao terceiro ossículo chamado estribo. O estribo, por sua vez, se conecta à janela oval que é a porta de entrada do ouvido interno. A junção dos ossículos com os ligamentos que os mantém unidos, a área em volta deles e o líquido do ouvido interno levam à uma ressonância que ocorre ao redor de 3.000 Hz . O acoplamento mecânico dessas partes também parece ser responsável pela curva do limiar da audição na figura 5 (KINSLER et al., 1999). A trompa de Eustáquio é responsável por ajustar a área entre o tímpano e a janela oval de modo a evitar súbitos gradientes de pressão e adaptar a impedância entre o meio externo e o meio aquoso no ouvido interno (PEREIRA et al., 2009).

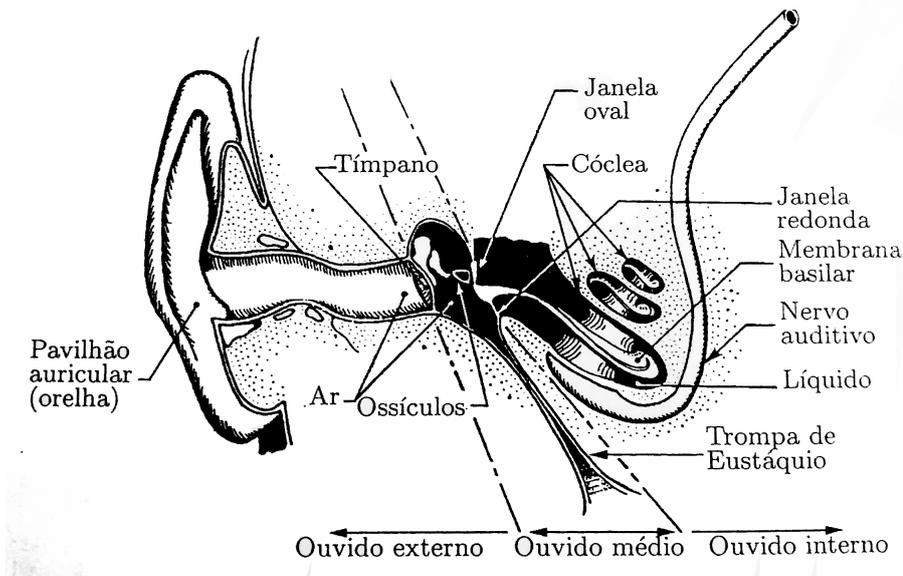


Figura 1 – Partes da região periférica do ouvido humano (PEREIRA et al., 2009).

O ouvido interno, mais conhecido como labirinto, tem três partes: vestíbulo (câmara de entrada), canais semicirculares e cóclea. O vestíbulo se conecta com o ouvido médio à partir de dois canais, a janela oval e a janela circular, ambos fechados de modo a evitar que o líquido escape do ouvido interno. Com exceção desses dois canais o ouvido interno é todo cercado por osso. A cóclea contém um tubo circular disposto como uma concha de caracol formando um cone de base com diâmetro igual a $0,9\text{ cm}$ e uma altura de aproximadamente $0,5\text{ cm}$. O tubo tem aproximadamente 2,7 voltas, um comprimento total de $3,5\text{ cm}$ e um volume de aproximadamente $0,05\text{ cm}^3$ (KINSLER et al., 1999). A decomposição espectral do sinal sonoro é feita pela cóclea e é devido à essa capacidade que somos capazes de interpretar e discriminar sons. Na cóclea existem células ciliadas distribuídas ao longo do tubo que, quando excitadas, produzem impulsos nervosos. Esses impulsos são enviados à região central por meio do nervo auditivo (PEREIRA et al., 2009).

1.2 Localização espacial

Nosso SAH tem incríveis mecanismos para localizar uma fonte sonora e processá-la separadamente do ruído de fundo do ambiente. Na localização espacial, usamos a Diferença Temporal Interauricular (Interaural Time Difference, ITD) e a Diferença de Intensidade Interauricular (Interaural Level Difference, ILD) para localizar uma fonte sonora em um ambiente. Essa habilidade, junto com pequenos movimentos da cabeça, pode nos dar a localização espacial exata de uma fonte sonora mesmo quando não a conseguimos escutar. Outro importante e incrível mecanismo que usamos em um ambiente com ruído de fundo é o efeito coquetel, que refere-se à nossa habilidade de focar no que uma pessoa está falando quando várias pessoas estão conversando simultaneamente (GELFAND, 2016). O efeito

coquetel foi descoberto por Colin Cherry em 1953.

1.2.1 Diferença de Intensidade Interauricular (ILD)

O ILD baseia-se no efeito de sombreamento presente em sons de alta frequência. Sons com frequência maiores que $1,6 \text{ kHz}$ podem ser comparados a um feixe de luz que quando encontram uma barreira, não conseguem transpô-la. Dessa forma, quando um som de alta frequência vem unicamente da esquerda do receptor, o ouvido direito deste receptor capta o mesmo sinal do ouvido esquerdo mas com uma diferença de amplitude. O ILD aumenta de acordo com o afastamento da fonte sonora da posição central, à frente do receptor, e com o aumento da frequência, ou seja, a atenuação do som causada pela cabeça fica mais evidente quando o som atinge frequências cada vez mais próximas de 20 kHz (GELFAND, 2016).

1.2.2 Diferença Temporal Interauricular (ITD)

O ITD é um efeito presente apenas em baixas frequências devido à capacidade desses sinais de difratar. A difração é um fenômeno que dá a capacidade dessas ondas de baixa frequência de contornar objetos e se espalhar pelo ambiente, ou seja, uma onda cuja fonte sonora está exatamente no ouvido esquerdo é capaz de contornar a cabeça e chegar ao ouvido direito. Dessa forma, perceber a localização de uma fonte a partir da diferença de amplitude já não é mais possível. Em vez disso, nosso SAH usa a diferença de tempo para determinar qual a localização do som. Isso quer dizer que a orelha cujo sinal sonoro chega antes é a orelha mais próxima da fonte sonora (GELFAND, 2016).

Usando um modelo simples da cabeça humana é possível calcular o ITD correspondente à uma fonte localizada em um certo ângulo. O ITD é dado pela fórmula

$$ITD = r(\theta + \text{sen}\theta)/c \quad (1.1)$$

onde θ é a posição em radianos correspondente à fonte sonora em relação à posição logo em frente ao nariz, r é o raio da cabeça ($r \approx 0,09 \text{ m}$) e c é a velocidade do som no ar ($c \approx 344 \text{ m/s}$).

Na tabela 1, é possível ver alguns valores de ITD obtidos através da equação acima. Nesta tabela, é possível observar que os valores obtidos são os mesmos para sons na frente e atrás. Isto significa que, isoladamente, o SAH não é capaz de determinar somente pelo ITD se o som está vindo da frente ou das costas. Para fontes sonoras periódicas de frequência entre 800 Hz e $1,6 \text{ kHz}$, a Diferença de Fase Interauricular (Interaural Phase Difference, IPD) também é usada como uma variante da ITD. A IPD se torna ambígua à medida que o comprimento de onda fica menor que o diâmetro da cabeça já que torna-se impossível determinar quantos ciclos da onda se passaram entre uma orelha e outra (GELFAND, 2016).

Tabela 1 – Exemplos de ITD para alguns ângulos

Ângulo da fonte	ITD (μs)
0°	0
30°	268
45°	390
90°	673
135°	390
150°	268
180°	0

Em termos de frequência, a localização espacial é mais fraca em frequências entre 800 Hz e 1.6 kHz devido à diminuição da influência do tempo e da fase e devido à falta do efeito de sombreamento nessas frequências. No entanto, nosso SAH é capaz de utilizar o fator mais evidente para determinar a localização sonora, evitando ficar dependente de um fator ou outro.

1.3 Loudness (Volume ou altura do som)

Quando escutamos um determinado som temos uma sensação de intensidade sonora. Se aumentarmos o volume desse som, teremos a sensação de que a intensidade sonora também está aumentando. Isso é o que chama-se de *Loudness* ou nível de audibilidade. Essa sensação é dependente da frequência e não existe uma relação direta entre a sensação que sentimos e o nível real de pressão sonora. O primeiro cientista a estudar esse fenômeno foi Kingsbury em 1927. Porém, os primeiros a terem resultados concretos foram os cientistas Fletcher e Munson em 1933 que propuseram uma série de curvas que relacionavam sensação auditiva com intensidade sonora e que foram chamadas de curvas Phon (GELFAND, 2016). Essas curvas podem ser vistas na figura 2.

As curvas equal-loudness contour ou simplesmente curvas Phon foram construídas da seguinte maneira: foi definido que 1 Phon corresponderia à um $dB SPL$ à 1 kHz e que a curva representaria a quantidade de estímulo necessária para que os sons em outras frequências tivessem a mesma sensação de volume, ou *Loudness*, do som de referência à 1 kHz . Ou seja, a curva de 50 Phons representa a quantidade de estímulo necessário para que os sons em outras frequências soem com a mesma intensidade do som de referência, 1 kHz , com 50 $dB SPL$ de pressão sonora. Como era de se esperar, os gráficos acusam que a região entre 2 kHz e 5 kHz possui uma sensibilidade maior que outras regiões. Isso se dá devido à ressonância do canal auditivo.

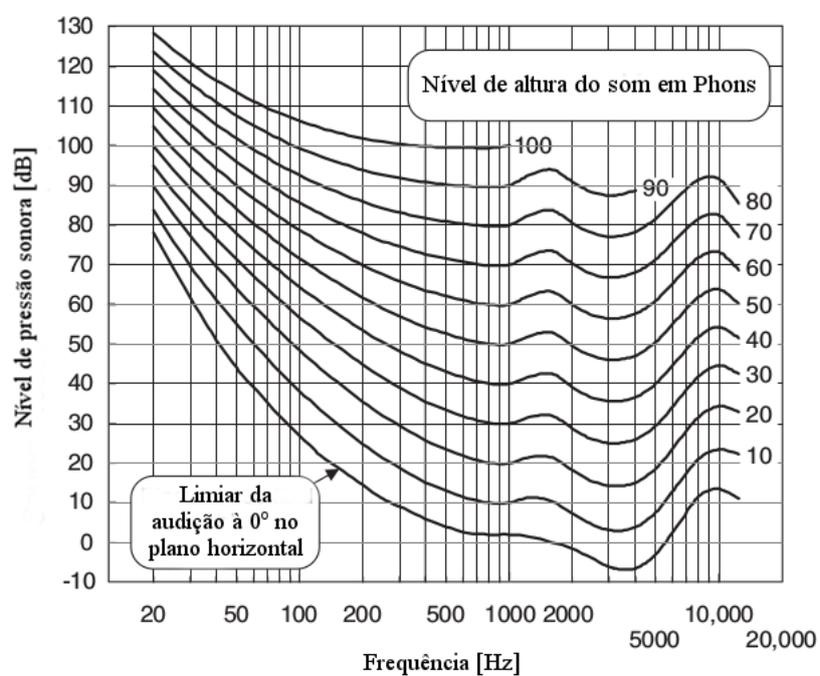


Figura 2 – Curvas Phon propostas por Fletcher e Munson (GELFAND, 2016).

2 A onda sonora

2.1 Velocidade do som

O som é a percepção do nosso corpo de uma onda que se propaga com uma certa velocidade em um certo meio (gás, líquido, sólido ou plasma) devido à um distúrbio mecânico. Quando uma onda se propaga em um meio, ocorre a propagação da onda sem que as partículas do meio sejam carregadas no sentido de propagação da onda e essa propagação pode acontecer de diversas formas. Em um fluido, a propagação de uma onda sonora dá-se longitudinalmente, ou seja, a direção com que a onda se propaga é paralela ao movimento induzido nas partículas do meio (JARUSZEWSKA et al., 2015). É possível observar o comportamento de uma onda sonora em um fluido na figura 3.

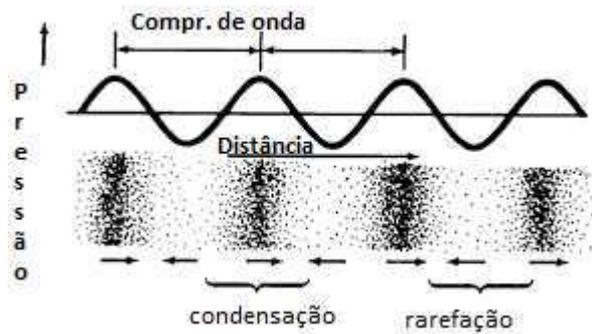


Figura 3 – Propagação de uma onda sonora pelo ar.

Conforme esta onda sonora se propaga, é possível observar que ela o faz com uma certa velocidade. Essa velocidade é chamada de velocidade do som, c , e depende exclusivamente do meio em que ela se propaga e não da intensidade do distúrbio que a gera. A regra é que o som se propaga mais rapidamente em meios que tenham uma densidade [$kg.m^{-3}$] maior (JARAMILLO; STEEL, 2014). É por esse motivo que o som se propaga com uma maior velocidade na água (aproximadamente $1.500 m/s$) do que no ar (aproximadamente $343 m/s$ em um ar com baixa umidade e à $20^{\circ}C$) (JARUSZEWSKA et al., 2015).

2.2 Frequência

Outra característica de uma onda sonora é a frequência. A frequência é o inverso do período da onda, T , que é o tempo que a onda leva para se repetir, ou seja, o tempo entre dois picos ou dois vales consecutivos.

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (2.1)$$

Ondas com somente uma componente de frequência são chamadas de ondas de tom puro. Estas ondas não são comuns na natureza. Comumente, o que encontramos é uma soma de diversas ondas com frequências distintas que quando somadas originam um som como o de uma buzina de carro ou até mesmo o som da chuva. Na figura 4 é possível perceber a diferença entre uma onda de tom puro e um ruído comum. A linha vermelha tracejada representa a amplitude média da onda sonora.

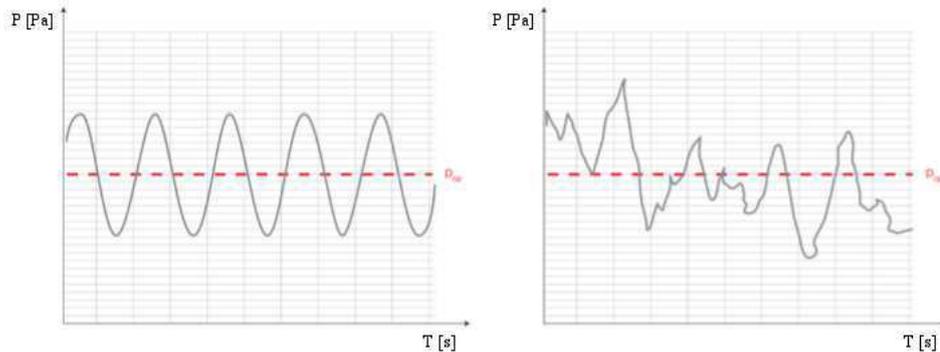


Figura 4 – Comportamento de uma onda sonora de tom puro e um ruído no tempo (JARUSZEWSKA et al., 2015).

Também é possível descobrir a frequência de uma onda com base no seu comprimento de onda, λ , e sua velocidade, c . O comprimento de onda é dado como a distância, em metros, que uma onda percorre em um ciclo, ou um período. Dessa forma, a frequência pode ser dada por

$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ [Hz]} \quad (2.2)$$

2.3 Pressão sonora

O parâmetro acústico mais medido é a pressão sonora, uma vez que ela é o fenômeno físico ao qual o nosso sistema auditivo é sensível e o parâmetro acústico mais fácil de medir. Em uma onda sonora, a pressão sonora instantânea é a pressão criada pelo movimento das partículas do meio e é dada em Pascal (Pa). Em geral, a pressão é uma variável flutuante e seu valor em um dado instante de tempo não é relevante para a análise da onda sonora. No lugar de seu valor instantâneo, o valor médio temporal da altura do som expressa melhor o seu comportamento. A pressão eficaz (RMS), p_{rms} , é dada em Pascal, Pa , e é definida como

$$p_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_1+T} p^2(t) dt} \text{ [Pa]} \quad (2.3)$$

Entretanto, nosso sistema auditivo não responde a estímulos sonoros de forma linear. Nós percebemos os estímulos de forma aproximadamente logarítmica. Portanto, geralmente usa-se uma escala logarítmica para expressar o nível de pressão sonora de um

ambiente. Esse nível é expresso em termos de *dB SPL*. Decibel é uma escala logarítmica obtida à partir da razão de um valor com uma referência

$$dB = 10 \log \left(\frac{\text{variável}}{\text{valor de referência}} \right) \quad (2.4)$$

Para pressão sonora, o valor de referência, $p_{ref,rms}$, corresponde à variação mínima de pressão que conseguimos escutar, limiar da audição, e é igual à $2 \cdot 10^{-5} Pa$ (MAGALHÃES, 2013). Dessa forma, o nível de pressão sonora é dado por

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{rms}}{p_{ref,rms}} \right) \quad [dB SPL] \quad (2.5)$$

Na figura 5 é possível observar o nível de pressão sonora de alguns tipos de ruídos e as faixas de frequência que aqueles ruídos costumam estar presentes. Nessa figura, o eixo horizontal é a escala de frequência, dada em *Hz*, e o eixo vertical é a escala de pressão sonora, dada em *dB*. A faixa do meio, denominada frequências sônicas, corresponde à faixa de frequência de $20 Hz$ à $20.000 Hz$ que é a faixa de frequência que o ouvido humano consegue processar. A linha pontilhada entre $120 dB$ e $140 dB$ é o limite cuja transposição leva à perdas irreparáveis no sistema auditivo. A área dentro da linha pontilhada, de cor mais escura, corresponde à interseção das faixas de frequência que conseguimos escutar com a faixa de pressão sonora que é aceita pelo nosso sistema auditivo. É importante lembrar que o limiar auditivo varia de acordo com a frequência e que a faixa mais sensível do ouvido humano é a faixa de $2.000 Hz$ à $6.000 Hz$ e é devido à isso que o limiar da audição apresenta seu valor mais baixo nessa faixa (KINSLER et al., 1999).

2.4 Propagação do som em espaços abertos

Em espaços abertos, espaços sem barreiras, o som se propaga livremente sem interrupções até diminuir sua amplitude a ponto de não ser mais escutado. É de conhecimento popular que quanto maior a distância de uma fonte sonora, menor a intensidade sentida pelo receptor. Mas poucos sabem como se dá essa relação e o porquê disso acontecer.

Para fins didáticos, fontes sonoras podem ser tratadas como fontes pontuais pulsantes que irradiam som em todas as direções. Essas fontes formam bolhas, cujas áreas superficiais representam a potência sonora total, e que representam a propagação do som no espaço como na figura 6. Esses fragmentos de esfera tem a mesma potência sonora, porém eles possuem áreas diferentes já que o raio do segundo fragmento corresponde à duas vezes o raio do primeiro.

Para compreender melhor o exemplo dado na figura 6, vamos começar definindo que a fonte sonora utilizada no exemplo está irradiando W watts de potência sonora em um espaço aberto. Este som que se irradia em todas as direções tem sua intensidade sonora,

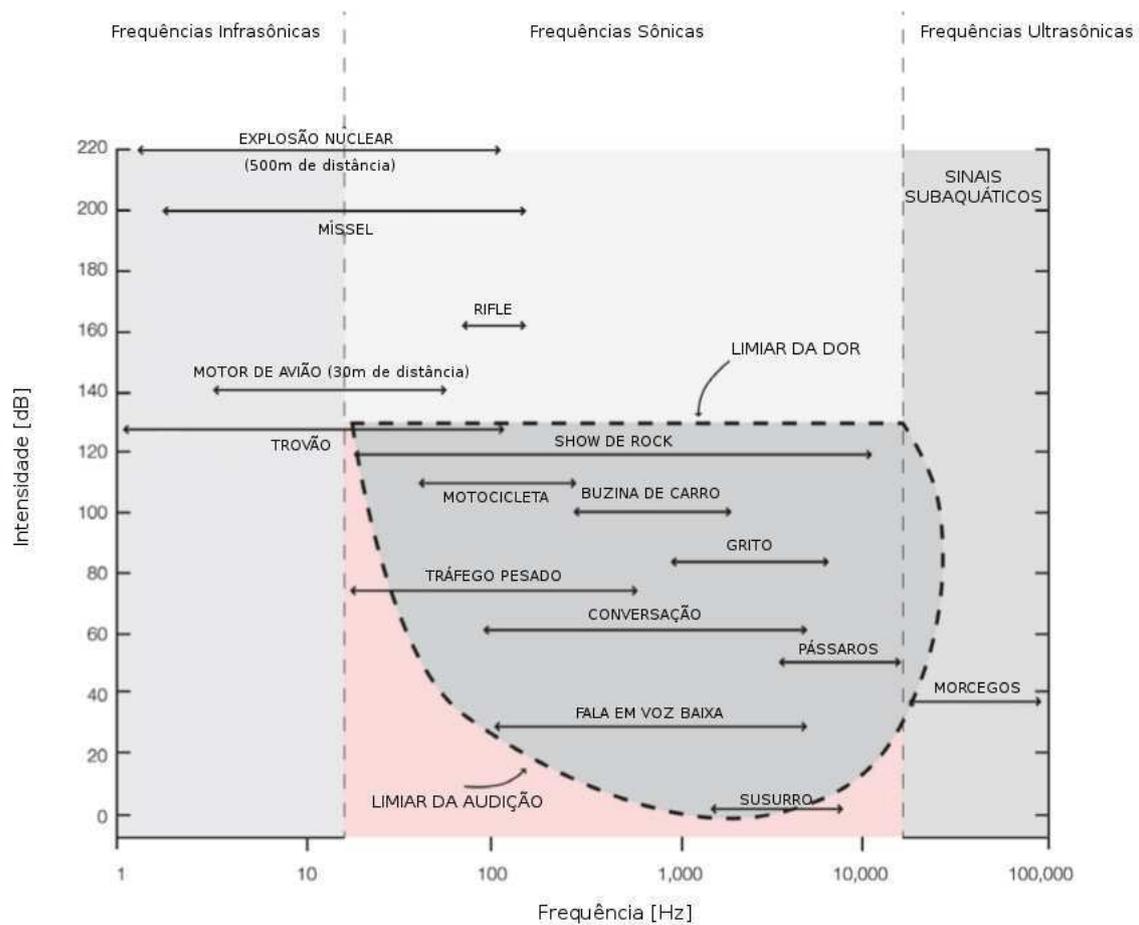


Figura 5 – Nível de pressão sonora de ruídos típicos e suas respectivas faixas de frequência (JARUSZEWSKA et al., 2015).

I , definida como potência sonora por centímetro quadrado, W/cm^2 . Logo, de acordo com a figura 6, a intensidade sonora seria a potência sonora dividido pela área total da esfera

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad [W/cm^2] \quad (2.6)$$

onde r é a distância da fonte sonora.

Dessa forma, podemos definir que

$$W = I_1 \times 4\pi r_1^2 \quad [Watts] \quad (2.7)$$

e a uma distância r_2 sabemos que

$$W = I_2 \times 4\pi r_2^2 \quad [Watts] \quad (2.8)$$

Portanto, já que as duas esferas de raio r_1 e r_2 possuem a mesma potência W , chegamos à conclusão que

$$I_1 \times 4\pi r_1^2 = I_2 \times 4\pi r_2^2 \quad (2.9)$$

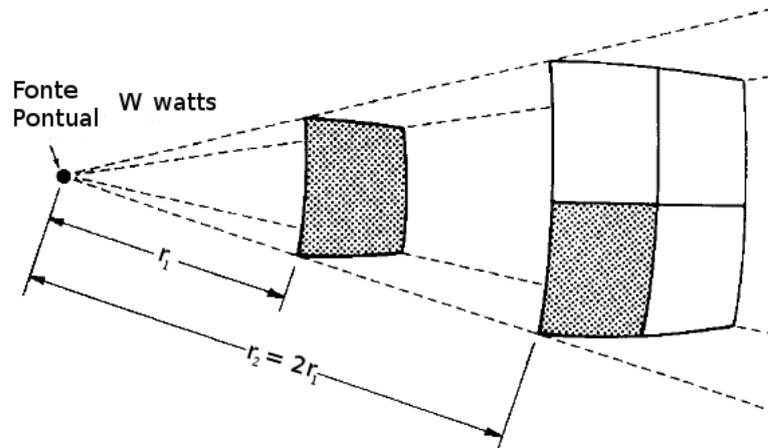


Figura 6 – Som irradiado de uma fonte pontual (BALLOU, 2013).

ou seja,

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (2.10)$$

A equação 2.10 é a lei do inverso dos quadrados. Esta lei nos diz que a intensidade do som é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre receptor e fonte (BALLOU, 2013). Como intensidade sonora não é um parâmetro que pode ser obtido facilmente, é mais lógico interpretarmos esta lei em termos de pressão sonora. Pressão sonora é proporcional à raiz quadrada da intensidade e a intensidade em r_2 é um quarto da intensidade em r_1 . Logo, podemos dizer que a pressão sonora em r_2 corresponde à metade da pressão sonora em r_1 , ou seja, 6 *dB* menor. Essa conclusão nos leva à afirmação de que a pressão sonora cai 6 *dB* cada vez que a distância para a fonte sonora dobra (BALLOU, 2013). Uma simples fórmula que pode ser usada para descobrir a atenuação causada pelo distanciamento em um ambiente livre de reflexões é

$$Ganho = 20 \log(d_1) - 20 \log(d_2) \quad (2.11)$$

onde d_1 diz respeito à primeira posição do receptor e d_2 diz respeito à nova posição que se encontra o receptor da fonte sonora. Caso o receptor se distancie, o resultado vai ser um número menor que zero, atenuação, e caso o receptor se aproxime da fonte, o resultado vai ser um número maior que zero, ou seja, um ganho.

Outros fatores como velocidade do vento e temperatura também podem vir a modificar a maneira como o som se propaga. Quando uma fonte sonora encontra uma forte ventania, ela tende a se propagar mais facilmente na direção do vento do que contra ele (LONG, 2005). Essa é uma conclusão lógica visto que as ondas sonoras são ondas mecânicas que se propagam pelo ar. Um exemplo disto pode ser visto na figura 7.

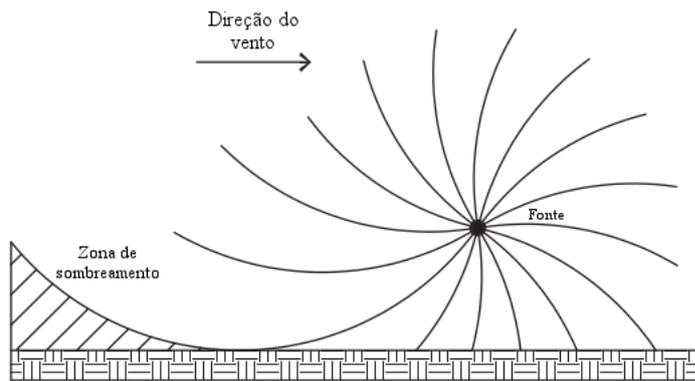


Figura 7 – Efeito do vento na propagação do som (LONG, 2005).

Com a temperatura acontece um fenômeno semelhante. Quando o som encontra uma região mais quente, sua velocidade muda devido à sua dependência com a temperatura e, conseqüentemente, forma-se um arco na propagação do som. Um exemplo deste fenômeno pode ser visto na figura 8.

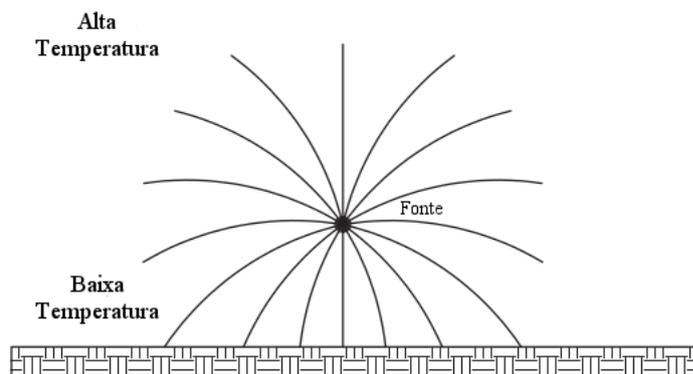


Figura 8 – Efeito de um gradiente de temperatura na propagação do som (LONG, 2005).

3 Acústica arquitetônica

A acústica arquitetônica é o ramo da acústica que trata da propagação do som em ambientes fechados de uso específico como teatros, auditórios, salas de recitais, estúdios ou até mesmo escritórios comerciais. Esse ramo da acústica tem como principal finalidade o estudo e adaptação de salas para provocar um melhor conforto acústico no receptor. Seja em uma sala de aula ou em estúdio de masterização.

3.1 Acústica de salas - conceitos gerais e principais parâmetros

Na figura 9 está ilustrado o universo da acústica em três domínios onde, da esquerda para a direita, está o auditório onde é possível vivenciar campos sonoros objetivos e que causam sensações subjetivas das condições acústicas do ambiente. Nestes três domínios do mundo concreto a complexidade e o número de variáveis que dizem respeito à acústica da sala são incontáveis. Dessa forma, como em muitos outros aspectos da vida, foram elaborados conceitos, parâmetros e vocabulários que simplificassem a problemática da acústica de uma sala e diminuísse a complexidade do projeto. Da direita para a esquerda, no mundo abstrato, primeiro definiu-se um vocabulário que descrevesse as variadas sensações acústicas em um ambiente, depois torna-se necessário definir matematicamente e objetivamente tais sensações de forma a descobrir que parâmetros poderiam levar à estas sensações e, por último, é feito um roteiro para servir de referência aos futuros projetistas. No entanto, mesmo com parâmetros definidos e um elaborado roteiro do que deve-se fazer em uma sala de concerto, ainda precisa-se de uma boa dose de intuição e gosto pessoal pois, mesmo com todas as definições, nem tudo ainda está definido e totalmente compreendido no mundo da acústica (DUNN et al., 2015).

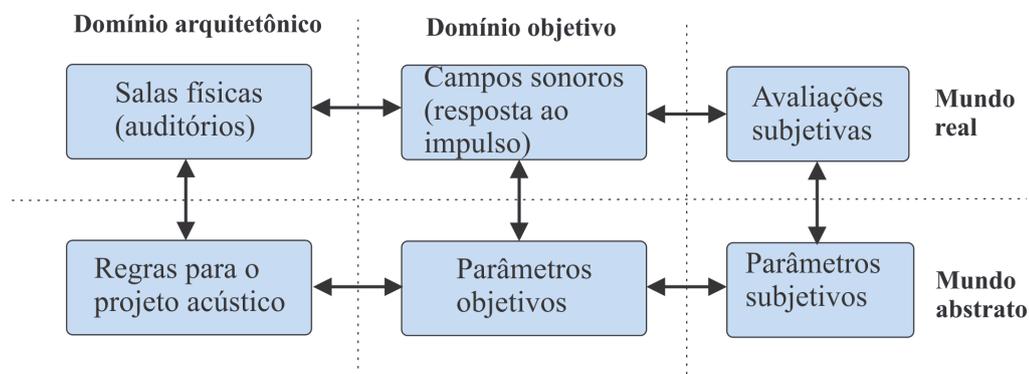


Figura 9 – Acústica subjetiva para salas: conceitos gerais (DUNN et al., 2015).

Em geral, para o projeto de uma sala, segue-se a seguinte ordem de etapas:

1. Projeto acústico inicial: trabalhar com arquiteto(s) e engenheiros civis usando o conhecimento existente sobre a obra a ser executada;
2. Simulação computacional da acústica da sala;
3. Simulação física em escala reduzida (uso de maquete);
4. Medições na obra acabada;
5. Aplicação de medidas corretivas.

Para fins de um projeto, as etapas que envolvem simulação são especialmente importantes por diagnosticarem falhas que poderiam vir a comprometer o projeto inteiro. Um exemplo de software de simulação bastante usado por profissionais da área é o Odeon[®].

3.1.1 A resposta ao impulso

Em uma sala, a fonte básica de informação sobre todas as propriedades audíveis é a resposta ao impulso. Um impulso sonoro quando emitido por uma fonte sonora como na figura 10, viaja por toda a sala até chegar ao receptor. Se esse sinal for gravado, utilizando técnicas de multicanal e respeitando a direção de incidência do som, pode-se extrair dele toda a informação sobre a acústica da sala entre dois pontos específicos: fonte e receptor (DUNN et al., 2015).

Diferentemente do que acontece em um espaço aberto, dentro de uma sala o som que percebemos é uma soma do som proveniente diretamente da fonte sonora juntamente com suas reflexões. O som que chega primeiro ao receptor é aquele som que sai direto da fonte para o receptor sem passar por nenhuma reflexão. Todos os demais caminhos levam à um certo atraso e, conseqüentemente, à uma certa atenuação que dependem não só da distância percorrida mas também da superfície que o som colide. Quando o som colide com uma superfície, parte de sua energia é convertida em calor devido à capacidade desta superfície de absorver energia (EVEREST; POHLMANN, 2001)

Considere que um impulso foi emitido em uma sala como na figura 10 e, através de equipamentos de medição, foi gravada a resposta ao impulso da figura 11. Depois que o impulso é emitido, uma onda esférica se propaga pela sala colidindo com todas as superfícies da sala. Após o som direto, chegam as reflexões iniciais. Estas, chegam suficientemente cedo ao ouvido do receptor de modo a darem mais volume ao som direto. A importância destas reflexões está na sua influência direta na inteligibilidade do ouvinte. A parte final da resposta ao impulso corresponde à reverberação. A reverberação é fruto da colisão do som com várias outras superfícies de modo a percorrer um caminho muito maior que o som direto e as reflexões iniciais. Após várias reflexões, a tendência é que este som torne-se inaudível devido à quantidade de energia perdida no processo (DUNN et al., 2015).

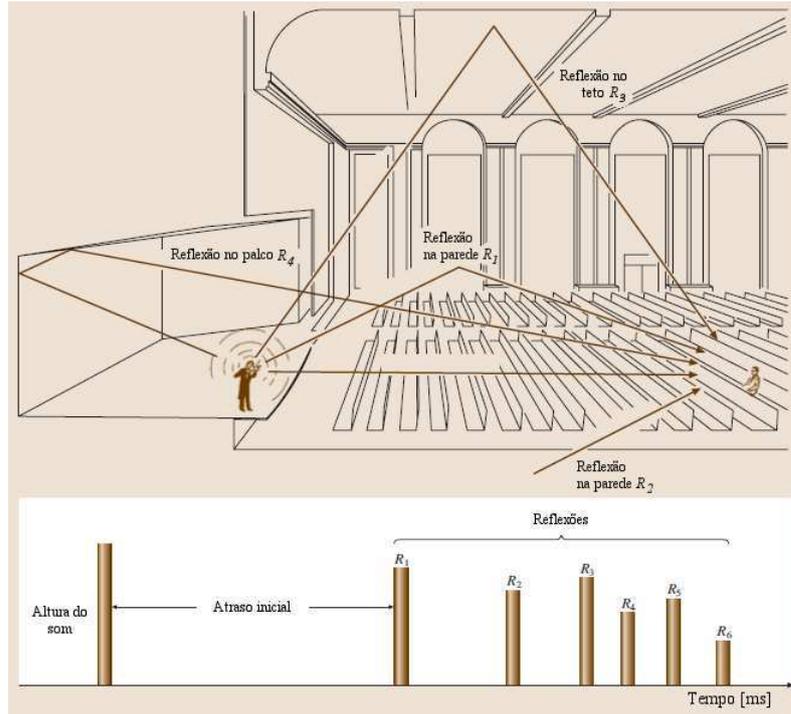


Figura 10 – O som direto e suas reflexões em uma sala (DUNN et al., 2015).

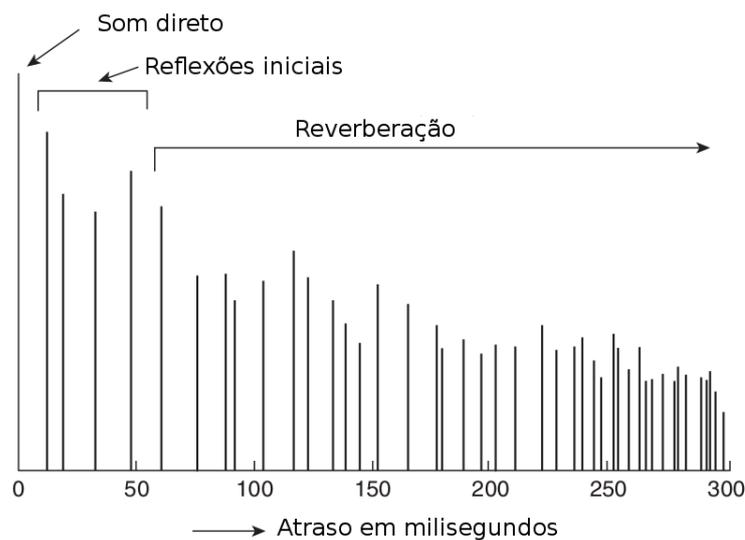


Figura 11 – Resposta ao impulso de uma sala (EVEREST; POHLMANN, 2001).

Na figura 12, é possível perceber que à medida que afasta-se da fonte sonora em uma sala fechada, o nível de pressão sonora médio chega a um valor estacionário. Este valor corresponde à soma do som direto e das reflexões (Reverberação). Próximo à fonte sonora a influência das reflexões é mínima. Mas à medida que o receptor afasta-se da fonte, tudo que se ouve é fruto das reflexões já que o nível de pressão sonora do som direto torna-se desprezível. A distância crítica dita como $1,82 \text{ m}$ é o ponto no qual o nível de pressão sonora do som direto é igual ao nível de pressão sonora da reverberação.

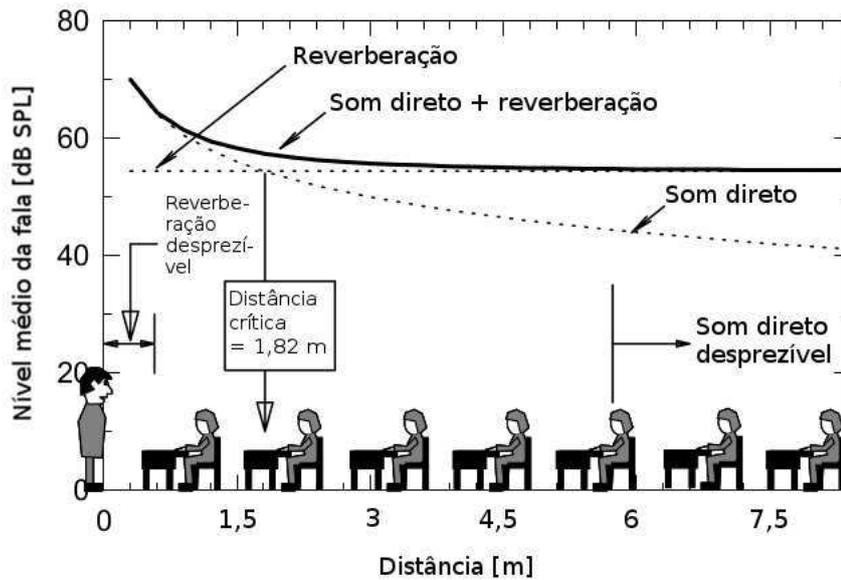


Figura 12 – Influência da reverberação no nível de pressão sonora de uma sala (BOOTH-ROYD, 2004).

3.1.2 Modos normais de salas retangulares

Em uma sala cujas dimensões são grandes se comparadas com o comprimento de onda de certas frequências, ocorre o aparecimento de modos acústicos. Esse fenômeno acontece quando ocorre o aparecimento de uma onda estacionária dentro de uma sala devido à reflexão do som entre duas ou mais superfícies.

Para melhor compreender como ocorrem os modos em uma sala, usaremos o exemplo de uma sala cujas dimensões são: $7 \times 5 \times 3 \text{ m}$. O modo de frequência mais baixa está associado à maior medida da sala, que neste caso é 7 m . Ele apresentará dois pontos máximos de pressão próximos às extremidades e um ponto de nulo exatamente no meio. Isso acontece devido às relações construtivas e destrutivas entre as reflexões que possuem fases diferentes causando soma ou subtração das amplitudes. Este modo pode ser facilmente visto no primeiro gráfico da figura 13. A frequência na qual esse modo acontece é dada pela divisão da velocidade do som por duas vezes o comprimento da sala. Para este caso, a frequência do modo é $344/(2 \times 7) = 24,57 \text{ Hz}$.

Os modos são geralmente descritos pelos índices l , m e n . O modo cujos valores são $(l, m, n) = (1, 0, 0)$ é a frequência fundamental se propagando na direção x . Esse modo é chamado de modo oblíquo. Quando o modo assume o valor $(l, m, n) = (1, 1, 0)$, ele é chamado de modo tangencial e isso quer dizer que ele se propaga simultaneamente nas direções x e y (LONG, 2005). Exemplos de modos oblíquos e tangenciais podem ser vistos na figura 14.

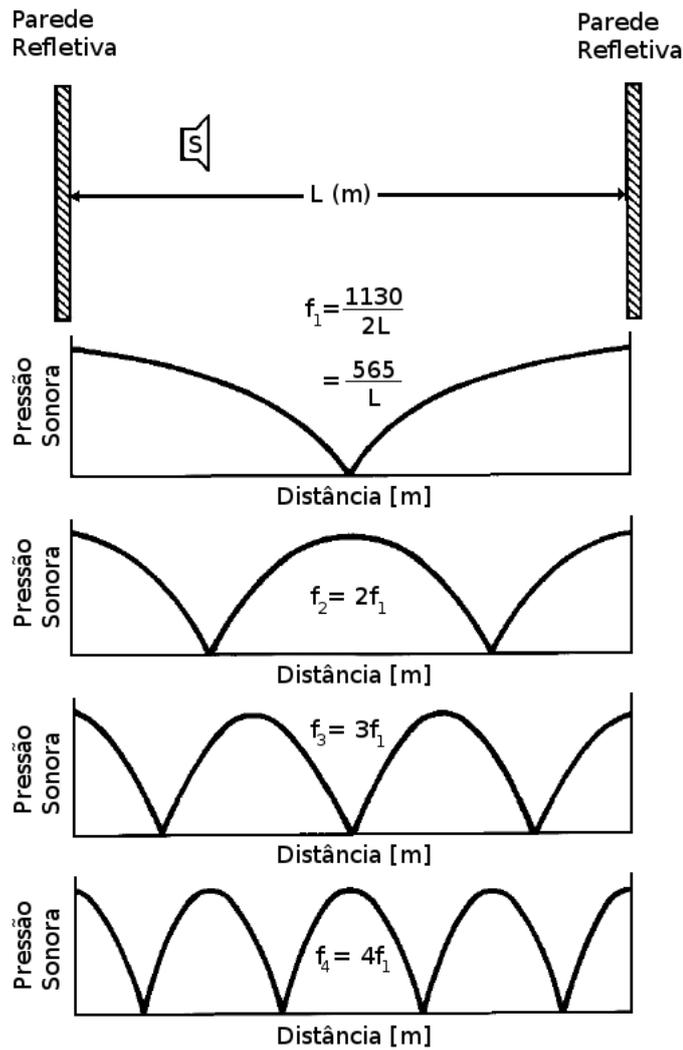


Figura 13 – Configuração dos modos axiais de uma sala de comprimento L (BALLOU, 2013).

Para calcular a frequência de cada modo, usa-se a equação

$$f_{l,m,n} = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{l}{l_x} \right)^2 + \left(\frac{m}{l_y} \right)^2 + \left(\frac{n}{l_z} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.1)$$

onde l , m e n são os inteiros que indicam o número de planos nodais perpendiculares aos planos x , y e z , c é a velocidade do som e l_x , l_y e l_z são as medidas da sala.

Utilizando a equação 3.1 para calcular os primeiros modos da sala, de medidas $7 \times 5 \times 3$ m, trará como resultado os modos da tabela 2.

O principal problema em ter modos em uma sala se dá quando alguns modos coincidem. Observando a tabela 2 é possível ver que à medida que os números dos índices aumentam, as frequências ficam cada vez mais próximas. Caso elas coincidam, a sala terá pontos em que certas frequências não apresentarão uma resposta satisfatória levando a sala a apresentar um som colorido que não corresponde à realidade (LONG, 2005).

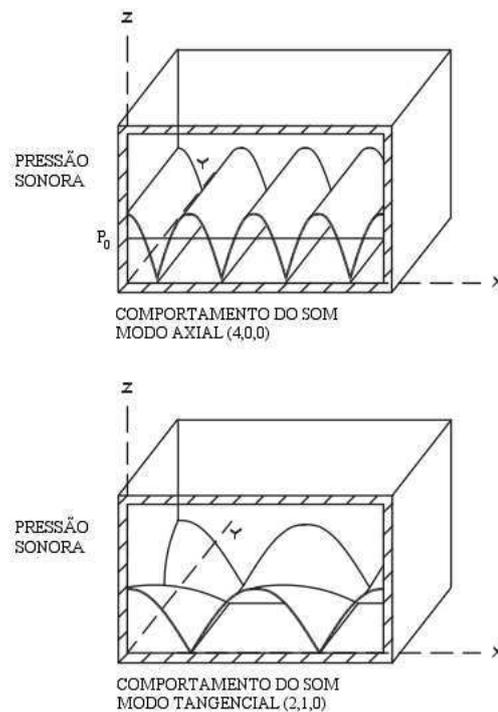


Figura 14 – Exemplo de modos oblíquos e tangenciais em uma sala (LONG, 2005).

Tabela 2 – Modos da sala investigada experimentalmente.

Índices (l, m, n)	f_n (Hz)
1, 0, 0	24,6
0, 1, 0	34,5
1, 1, 0	42,4
2, 0, 0	49,2
0, 0, 1	57,4
2, 1, 0	60,1

De modo a evitar que esses modos coincidam, pode-se escolher as dimensões da sala a ser contruída de acordo com as sugestões feitas por alguns autores como Bolt em 1946, que sugeriu uma série de proporções para as medidas de uma sala de modo a evitar este tipo de problema (LONG, 2005). O gráfico construído por ele pode ser visto na figura 15.

Para salas não retangulares, o cálculo dos modos é mais complexo e exige o uso de métodos computacionais como o método dos elementos finitos.

Em salas cujas dimensões são grandes o suficiente, existe uma região chamada de campo difuso cujos modos da sala não precisam mais ser levados em consideração. Um campo difuso pode ser descrito como um intervalo de frequências onde a sala possui uma densidade de energia igual em todos os pontos, ou seja, existe uma igual probabilidade do som chegar por qualquer direção.

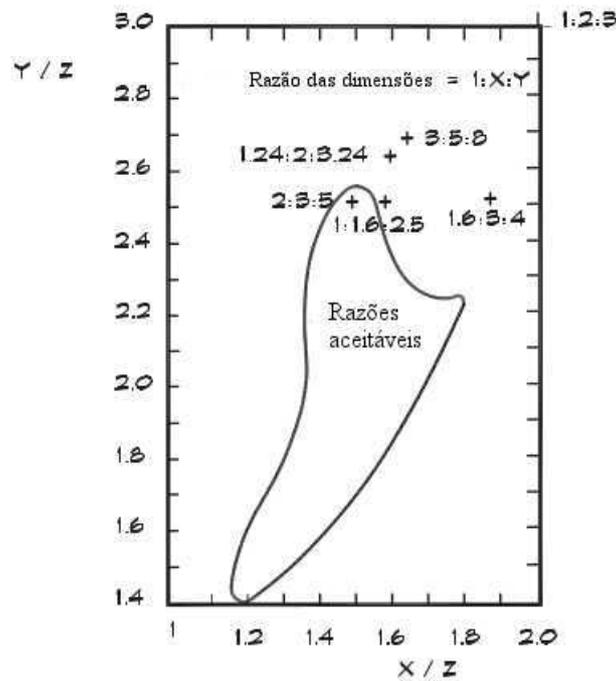


Figura 15 – Dimensões preferíveis para salas retangulares propostas por Bolt em 1946 (LONG, 2005).

A frequência à partir da qual os modos não precisam mais ser considerados é chamada de frequência de Schroeder e ela representa a transição entre a região dominada pelos modos e a região chamada de campo difuso. Esta frequência pode ser encontrada usando a equação

$$f_s = 2.000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}} \quad (3.2)$$

onde T_{60} é o tempo de reverberação e V é o volume da sala em m^3 .

Esta frequência nos permite dividir o comportamento da sala em regiões para que a medida correta possa ser tomada em relação à um determinado problema na acústica da sala. Na figura 16, é possível ver graficamente a divisão das regiões de uma sala.

3.1.3 Principais parâmetros acústicos

3.1.3.1 Tempo de reverberação (RT)

O tempo de reverberação é, sem dúvidas, o parâmetro acústico que melhor define uma sala (JARUSZEWSKA et al., 2015). Este parâmetro foi estudado primeiramente por Wallace Clement Sabine¹, no século 19, utilizando uma fonte sonora, seus ouvidos e um

¹ W. C. Sabine foi professor de física na universidade de Harvard. Sua tarefa de corrigir o problema de inteligibilidade da sala de aula do museu de arte Fogg, na universidade de Harvard, o levou à descobrir a relação entre tempo de reverberação, volume e quantidade de área absorvente. Sabine pegou algumas almofadas de assentos emprestadas do teatro mais próximo e descobriu que quanto mais almofadas

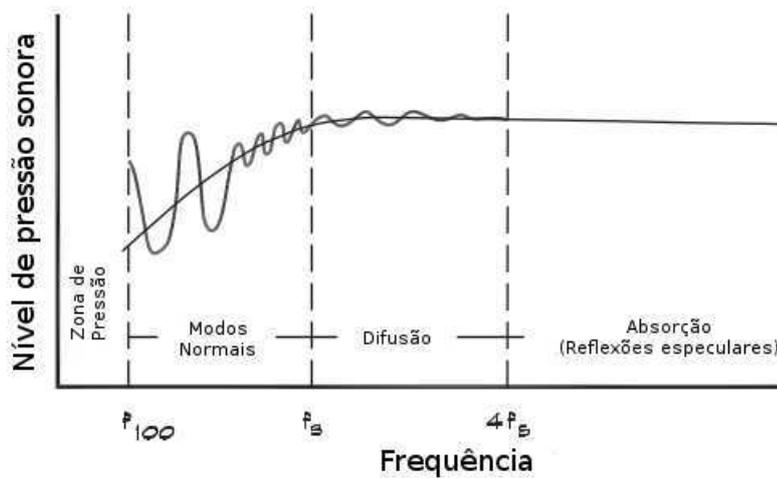


Figura 16 – Regiões da resposta em frequência de uma sala (LONG, 2005).

cronômetro. Sabine tentou medir o tempo que levava para o som em um determinado ambiente chegar ao nível da inaudibilidade (EVEREST; POHLMANN, 2001). Sua descoberta se deu devido à uma tarefa atribuída a ele de corrigir um problema de inteligibilidade em uma sala da universidade de Harvard cujo som perdurava por até 5 segundos após a propagação do mesmo (LONG, 2005).

Tempo de reverberação, T_{60} , pode ser definido como o tempo, em segundos, necessário para que um som impulsivo ou um som de teste interrompido caia 60 dB comparado com seu nível máximo diminuído de 5 dB (JARUSZEWSKA et al., 2015). Ou seja, é o tempo necessário para que o som caia de -5 dB até -65 dB do seu nível máximo. No entanto, uma queda de 60 dB é extremamente difícil de se chegar na prática devido ao ruído de fundo presente nas salas. Devido à isso, criou-se uma forma de medir o T_{60} à partir de uma queda de 30 dB e extrapolando o valor encontrado para encontrar o tempo correspondente à queda de 60 dB. Esse valor é chamado de T_{30} e tem um valor bastante próximo ao valor do T_{60} . Dessa mesma forma foram também criados os parâmetros T_{20} e T_{10} (JARUSZEWSKA et al., 2015). O parâmetro T_{30} pode ser obtido à partir da equação

$$T_{30} = 60dB \frac{t_{-35} - t_{-5}}{-5dB - (-35dB)} \quad (3.3)$$

onde t_{-x} corresponde ao tempo o qual a curva caiu X dB abaixo do seu nível inicial. Na figura 17 é possível ver um esboço da curva de decaimento de onde é extraído o tempo de reverberação. Esta curva de decaimento é denominada como $R(t)$ e teve sua formulação matemática criada por Schroeder (DUNN et al., 2015). Esta curva é obtida à partir do

ele colocava dentro da sala, mais rápida era a queda no nível de pressão sonora do som. Quando 550 almofadas foram colocadas na sala, o tempo de reverberação caiu para 1 s. Este experimento ficou marcado na história da acústica como o dia que começou a trajetória da acústica subjetiva de salas como uma ciência.

quadrado da resposta ao impulso, $h(t)$, da sala e é calculada por meio da equação

$$R(t) = \int_t^\infty h^2(t)dt = \int_0^\infty h^2(t)dt - \int_0^t h^2(t)dt \quad (3.4)$$

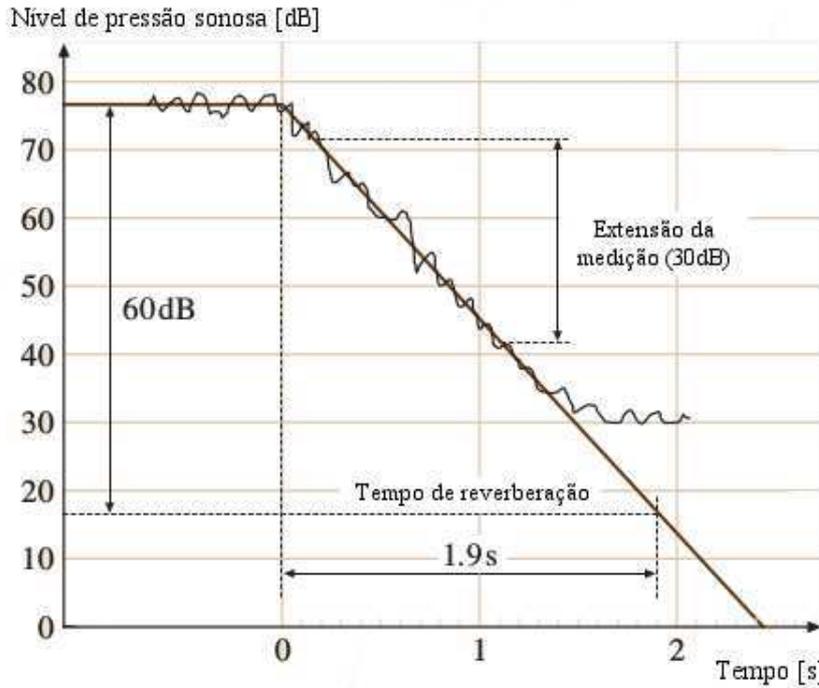


Figura 17 – Curva de decaimento $R(t)$ e a definição de tempo de reverberação (DUNN et al., 2015).

Além de definir o que seria o T_{60} , Sabine também chegou a encontrar uma fórmula empírica que relaciona o tempo de reverberação de um ambiente com seu volume e área de absorção. Essa equação se baseia no fato de que o som viaja pela sala como feixes que, ao se encontrar com uma superfície, são parcialmente absorvidos e parcialmente refletidos (KINSLER et al., 1999). Esta equação é chamada de equação de Sabine e é dada por

$$T_{60} = 0.161 \frac{V}{\bar{A}} \quad [s] \quad (3.5)$$

onde V é o volume total da sala e \bar{A} é o total de área absorvente em sabins. O total de área absorvente de uma sala é calculado multiplicando a área de uma região pelo seu coeficiente de absorção correspondente, e somando este resultado com o de todas as outras regiões da sala como na equação

$$\bar{A} = \sum_i S_i a_{Ei} \quad [Sabins] \quad (3.6)$$

onde S_i representa a área de uma dada superfície representada pelo índice i e a_{Ei} corresponde ao coeficiente de absorção dessa mesma superfície.

Depois de Sabine, muitos cientistas tem tentado identificar o tempo de reverberação ideal para música e para fala dependendo do tipo de uso do ambiente em questão. Vários

gráficos que sugerem tempos de reverberação para essas salas foram criados, mas o mais recente foi feito por Long em 2006 e pode ser visto na figura 18. Esse gráfico sugere qual o tempo de reverberação indicado para uma sala de acordo com seu uso e seu volume total.

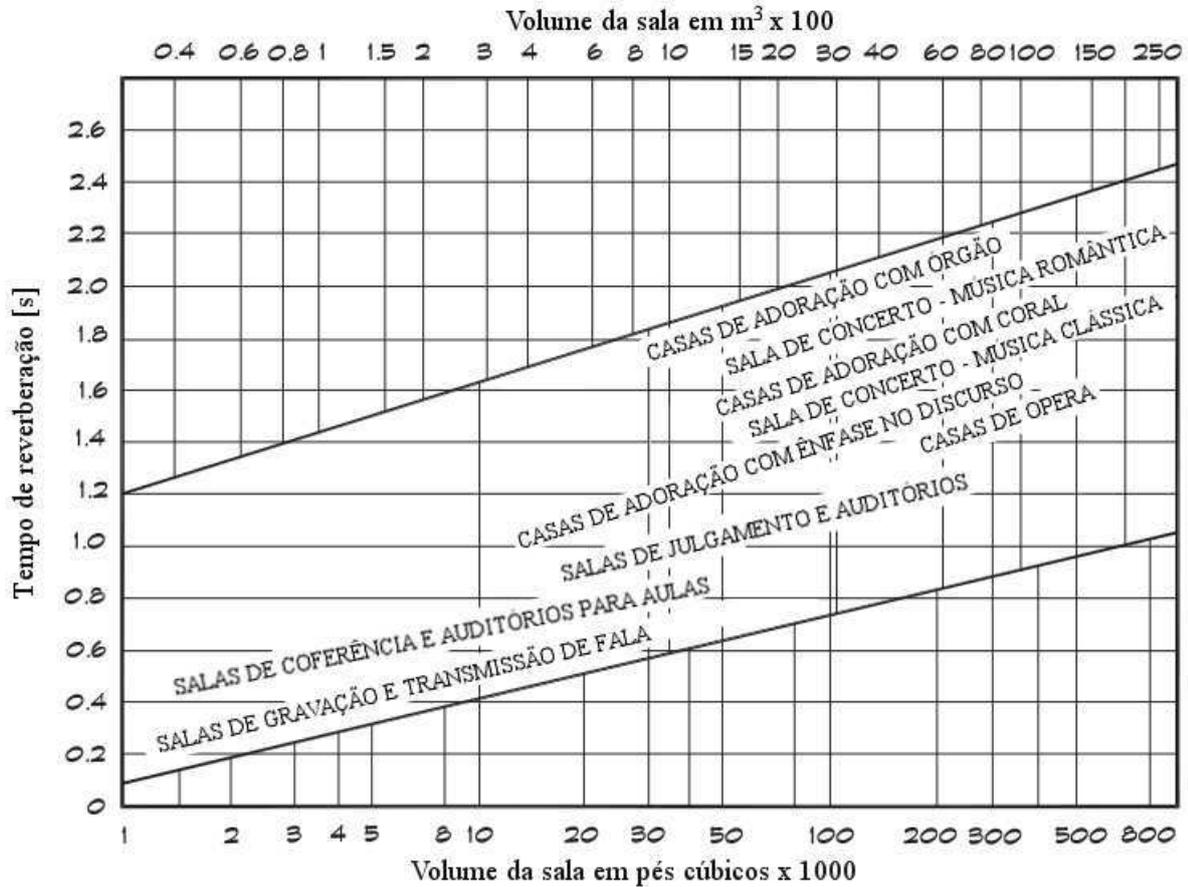


Figura 18 – Tempo de reverberação sugerido para salas de acordo com seu volume e uso (LONG, 2005).

Em 1930, Carl Eyring publicou uma teoria para o tempo de reverberação em salas baseado na idéia de R. F. Norris (LONG, 2005). Essa equação foi chamada de equação de Norris Eyring, em homenagem aos dois cientistas, e é dada por

$$T_{60} = \frac{0,161V}{-S \ln(1 - \bar{a}_E)} \quad [s] \quad (3.7)$$

onde S é a área total da sala e \bar{a}_E é dado por

$$\bar{a}_E = \frac{1}{S} \sum_i S_i a_{Ei} \quad (3.8)$$

nesta equação, a_{Ei} corresponde ao coeficiente de absorção de cada material e S_i corresponde à área superficial desse mesmo material.

A equação de Sabine tem resultados mais precisos quando os materiais na sala são pouco absorventes ($\bar{a}_E < 0,2$). Para os demais casos, a equação de Norris Eyring é mais adequada.

3.1.3.2 Early Decay Time (EDT)

Quando uma fonte impulsiva excita uma sala, a resposta da sala à esta fonte vem com várias informações sobre a acústica do lugar. Nos primeiros 10 a 20 *ms* há uma queda de nível no som que foi projetado na sala. Esta primeira queda, de 0 *dB* a -10 *dB* corresponde ao EDT. Em geral, o EDT expressa melhor a percepção do receptor ao tempo de reverberação da sala enquanto que o T_{30} , T_{20} e T_{10} são mais relacionados à quantidade de material absorvente do local (JARUSZEWSKA et al., 2015). O EDT pode ser dado por

$$EDT = 6(t_{-10}) \text{ [s]} \quad (3.9)$$

ou

$$EDT = \frac{60}{A_{(0dB \rightarrow -10dB)}} \text{ [s]} \quad (3.10)$$

onde $A_{(0dB \rightarrow -10dB)}$ é a taxa de decaimento em *dB/s* do estado inicial até o valor -10 *dB*.

O valor obtido para o EDT é influenciado pela distribuição temporal das reflexões iniciais. Essa distribuição é fortemente dependente da posição que se encontra o receptor e a fonte e, por isso, é comum obter valores diferentes para o EDT ao longo da sala (DUNN et al., 2015).

3.1.3.3 Força do som (G)

Um outro parâmetro que pode ser medido em uma sala é a força do som. Sua definição é dada como a diferença em *dB* entre o nível de uma fonte, contínua e calibrada medida em uma sala, e o mesmo nível que essa fonte produz à 10 *m* de distância em uma câmara anecóica. Esse parâmetro pode ser também obtido a partir da resposta ao impulso de uma sala pela razão da energia total da resposta impulsiva e da energia do som direto gravado à 10 *m* de distância da fonte (DUNN et al., 2015). A equação para G é dada por

$$G = 10 \log_{10} \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) dt}{\int_0^{t_{dir}} h_{10m}^2(t) dt} \text{ [dB]} \quad (3.11)$$

onde $h_{10m}(t)$ é a resposta ao impulso gravada à 10 *m* de distância e t_{dir} é o tempo de duração do som direto.

3.1.3.4 Clareza (C)

Clareza descreve a facilidade com que os detalhes de um som sejam percebidos em uma sala sem serem mascarados por reflexões atrasadas e pela reverberação. Por definição, a clareza é uma propriedade complementar à reverberação (DUNN et al., 2015).

Quando uma reflexão chega com até 80 *ms* de atraso, sua contribuição é integrada junto com o som direto pelo nosso SAH de tal forma que o som é percebido como o som

direto amplificado. Desta forma, foi criado um parâmetro que relaciona a energia das reflexões iniciais em função da reverberação (DUNN et al., 2015). Sua equação é dada por

$$C = 10 \log_{10} \left[\int_0^{80ms} h^2(t) dt / \int_0^{\infty} h^2(t) dt \right] \quad [dB] \quad (3.12)$$

Quanto maior o valor obtido por C , maior a predominância das reflexões iniciais e maior a impressão de clareza.

3.2 Absorvedores

Materiais absorvedores são materiais que desempenham um papel fundamental na acústica de ambientes. Esse tipo de material é, em geral, bem maleável e não suporta muitas adversidades climáticas como sol e chuva contantes. Sua principal função está no controle de reflexões e do tempo de reverberação de um ambiente, como foi visto nas equações de Sabine e Norris Eyring. Como pode ser visto na figura 19, parte da onda que incide no material é absorvida e parte dela é refletida. A quantidade de energia absorvida por esse material é indicada à partir do seu coeficiente de absorção que é um valor geralmente entre 0 e 1, onde 1 representa um material totalmente absorvente e 0 representa um material totalmente refletivo (COX; D'ANTONIO, 2009).

Para medir o coeficiente de absorção de um material absorvente qualquer, pode-se usar a equação de Sabine de modo a medir o tempo de reverberação sem o material, e com o material. Com base na diferença que esse material causou no tempo de reverberação, é possível calcular seu coeficiente de absorção utilizando a equação de Sabine. Um outro método mais preciso para o cálculo do coeficiente de absorção de um material é a técnica utilizando um tubo de impedância. Por necessitar de equipamentos bem especiais e de custo elevado, essa técnica é geralmente utilizada somente em laboratórios especializados (COX; D'ANTONIO, 2009).

Na maioria dos casos, o material absorvente deve ser distribuído igualmente entre todas as superfícies para um melhor controle do tempo de reverberação. No entanto, em alguns casos isto não é verdade. Alguns desses casos são: uma fábrica deve ter todo o seu material absorvente colocado no teto, em uma sala de piscina o material absorvente também deve estar no teto devido ao contato com a água e em uma sala de aula o material absorvente nunca é colocado nas paredes, somente no chão e no teto (COX; D'ANTONIO, 2009).

3.3 Difusores

Os difusores são uma importante ferramenta do engenheiro acústico e que, junto com os absorvedores, podem causar uma mudança significativa na acústica do ambiente.

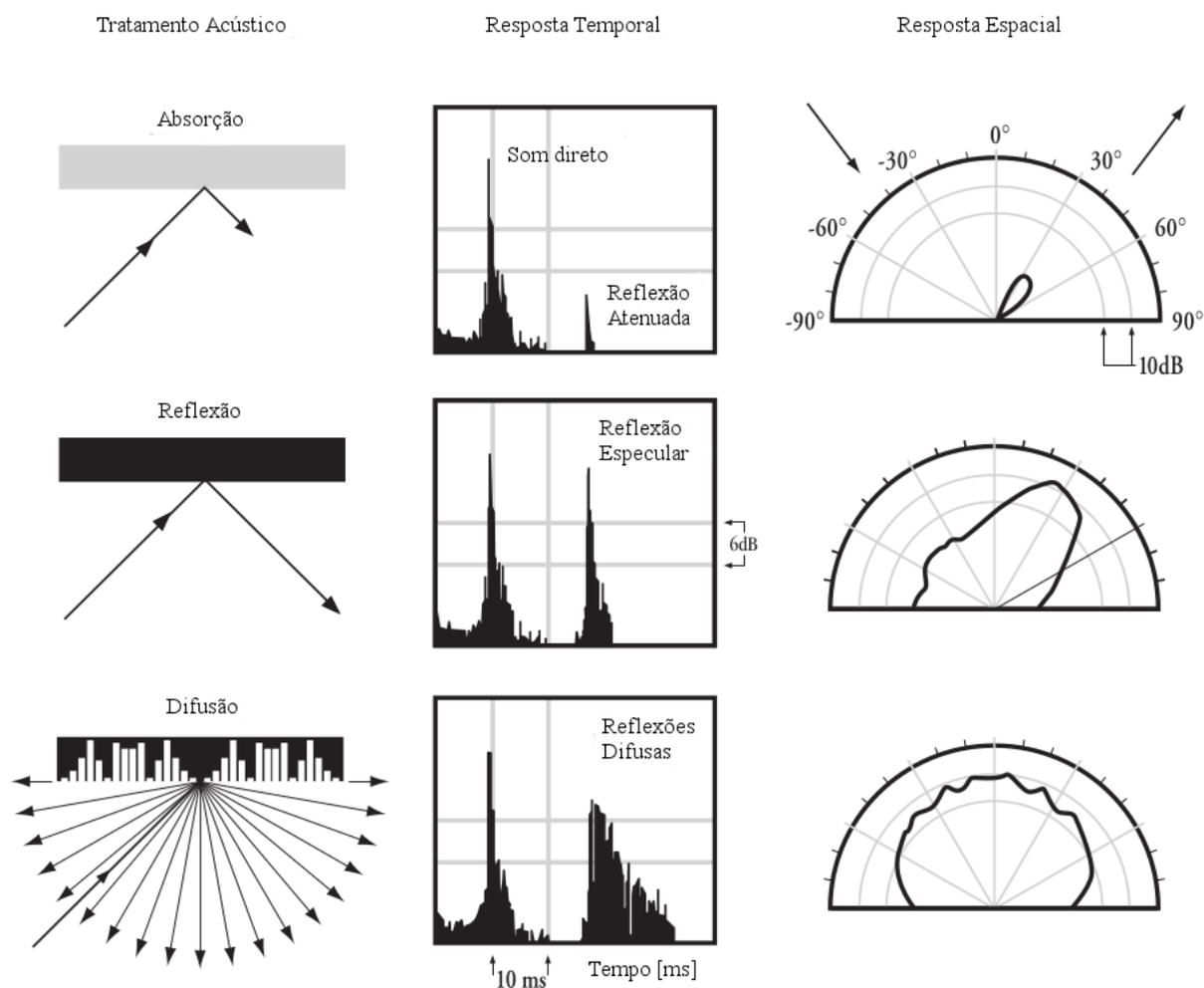


Figura 19 – Características temporal e espacial de absorvedores, refletores e difusores (COX; D'ANTONIO, 2009).

Os difusores são, em geral, usados quando há necessidade de corrigir falhas em reflexões sem que haja perda de energia, ou seja, sem que haja alteração no tempo de reverberação do ambiente. Um uso comum para os difusores é na correção de ecos. Os ecos são reflexões atrasadas de amplitude considerável que, quando chegam ao ouvinte, dão a sensação de que o mesmo som foi tocado duas vezes. Este tipo de situação ocorre muito em formações rochosas e em salas cujas dimensões são muito grandes (COX; D'ANTONIO, 2009). Na figura 20 é possível observar o efeito de um difusor sob a incidência de uma onda sonora.

O difusor apresentado na figura 20 é chamado de difusor de Schroeder. Esses difusores proporcionam não somente difusão espacial, como mostrado na figura 20, como também difusão temporal, como pode ser visto na figura 19. Esta difusão temporal se dá devido à variação da profundidade das cavidades do difusor.

Outra aplicação para difusores está na amenização do efeito provocado por comb filtering. Comb filtering é um efeito que acontece em algumas salas quando uma reflexão e

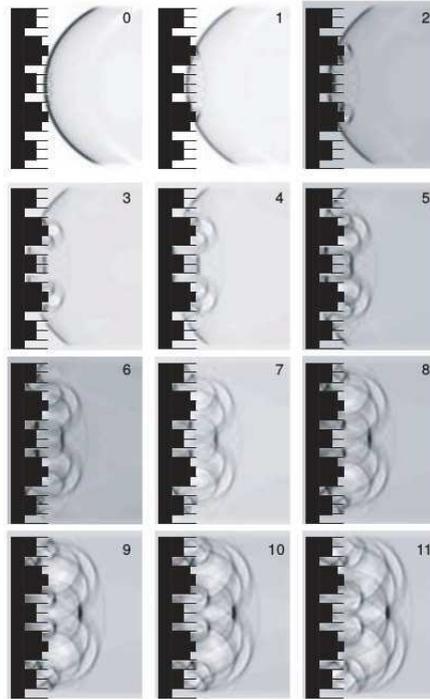


Figura 20 – Atuação de um difusor sob uma onda sonora (COX; D'ANTONIO, 2009).

o som direto causam uma interferência destrutiva entre si. Essa interferência destrutiva acontece só em certas frequências causando uma coloração indesejável no som. Um difusor aplicado sobre esta superfície faz com que o efeito do comb filtering seja amenizado (COX; D'ANTONIO, 2009). Na figura 21 é possível ver o efeito de um difusor nesta situação.

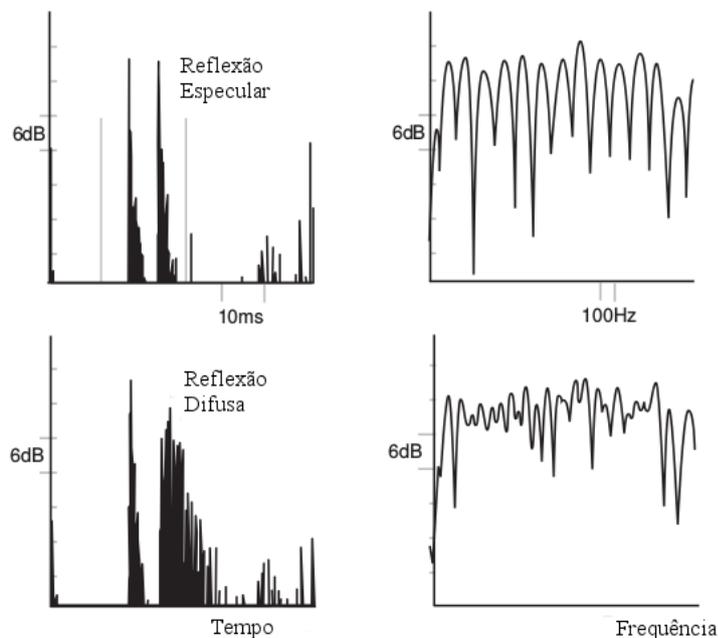


Figura 21 – Resposta temporal e espectral de uma superfície refletiva e um difusor (COX; D'ANTONIO, 2009).

3.4 Ruído

De uma forma geral, podemos categorizar um ruído ao ar livre de duas formas: fonte móvel e fonte fixa. As fontes móveis de ruído são geralmente originadas por um automóvel, um avião ou qualquer outro tipo de fonte sonora que se mova. As fontes fixas são aquelas originadas por uma reforma em um ambiente, caixas de som ou até mesmo alguém discursando em local público. Nessa situação, ao ar livre, vários fatores podem ser decisivos na propagação do som como barreiras, direção do vento, humidade e temperatura do ar e até mesmo a velocidade da fonte sonora. Porém, à medida que o receptor se aproxima da fonte, esses fatores passam a ter cada vez menos influência fazendo com que outro fator que não seja distância ou diretividade da fonte tenha uma importância mínima na quantidade de ruído captada pelo receptor (LONG, 2005).

Como a fonte de estudo desse trabalho consiste em dois ambientes fechados, este trabalho não se aprofundará em ruídos móveis. O ruído percebido dentro de uma sala de aula ou de um auditório é sempre um ruído fixo com características de um ruído estacionário. Portanto, ele tem características que não variam com o tempo e são, em geral, bem definidos na literatura.

3.4.1 Tipos de transmissão de ruído

Sabendo que as fontes de estudo são salas cujos limites são definidos por paredes rígidas, é importante que seja abordada a transmissão do som por entre estes limites. O pressuposto mais importante quando se fala em propagação do som em estruturas físicas é que o som gera vibração e a vibração gera som (MAGALHÃES, 2013). Isso quer dizer que qualquer tipo de ruído do lado de fora de uma sala gerará uma vibração correspondente na parede e essa vibração gerará som no interior da sala. O mesmo se aplica quando se fala em uma vibração gerada por um impacto na parede, piso ou teto. Esta vibração se propagará pela estrutura e, oportunamente, gerará som que irradiará desta estrutura. No entanto, nem todo ruído virá do lado de fora da sala. Na verdade, a maior parte deles são originados dentro da sala e propagados através do ar.

É possível dividir a transmissão de ruído em 4 categorias distintas: ruído propagado pelo ar, ruídos de pisadas, deflexão estrutural e rangidos do chão. Cada uma dessas categorias são bem distintas em relação às suas propriedades e requerem soluções igualmente distintas (LONG, 2005).

O ruído propagado pelo ar pode apresentar fontes internas ou externas. No caso de salas comuns podemos listar as conversações, sistema de ventilação e ruído originado pelo tráfego de carros como as principais fontes de ruído deste tipo. Esse tipo de ruído é ainda mais perigoso quando aliado à um alto valor do tempo de reverberação da sala em questão (ASTOLFI; BOTTALICO; BARBATO, 2012). Na figura 22 é possível observar

as características no domínio da frequência de alguns desses ruídos citados. Dentre eles, o ruído que possui características mais parecidas com o da fala é o ruído originado pelas conversações paralelas dentro da mesma sala. As soluções mais comuns para essa problemática são o emprego de material absorvedor na sala e o preenchimento de aberturas que possam vir a permitir a propagação do som de fora para dentro da sala (LONG, 2005).

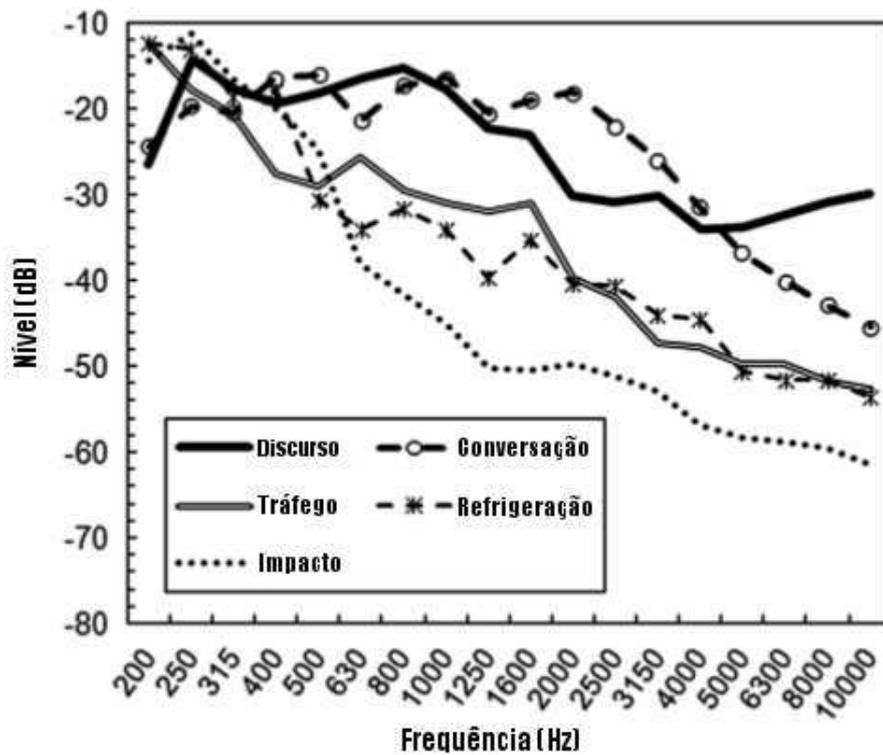


Figura 22 – Características de alguns tipos de ruído no domínio da frequência (ASTOLFI; BOTTALICO; BARBATO, 2012).

O ruído causado pelo caminhar de uma pessoa tem origem no impacto de um objeto duro, alguma parte rígida da sola de um calçado, com o piso que propaga esse impacto pela estrutura até chegar na sala cujo receptor está inserido. Esse ruído é percebido como um ruído de frequência mais alta que o ruído causado pela deflexão estrutural e está intimamente ligado com a rigidez do piso. O som deste tipo de ruído parece com um estalo de alta frequência. Uma solução prática para esse tipo de problema está no emprego de tapetes e carpetes no piso que está servindo como fonte do ruído (LONG, 2005).

Quando uma pessoa caminha por uma sala, pula ou derruba um objeto de grande massa no chão, o piso reage à esse impacto como um sistema de massa-mola. O que acontece microscopicamente é uma deflexão do piso e essa deflexão se propaga pela estrutura como uma onda de baixa frequência. Diferentemente do ruído causado pelo impacto de um calçado no chão, esse ruído é de baixa frequência e seu som se assemelha muito ao som de um bumbo. Este tipo de ruído é muito mais difícil de tratar e requer um desacoplamento

entre o teto e o piso, assim como o emprego de material absorvedor no espaço entre essas estruturas (LONG, 2005).

Rangidos são muito comuns em pisos de madeira e esse tipo de ruído pode ser considerado como uma fonte pontual ao redor do ponto de contato entre o calçado e o piso. Esses tipos de pisos não são comuns no Brasil e sua solução mais simples é evitar esse tipo de estrutura (LONG, 2005).

3.4.2 Curvas de critério de ruído

As curvas de critério preferíveis foram curvas de critério de ruído propostas por Beranek em 1971 como uma correção da versão anteriormente proposta por ele em 1957. Essas curvas são sugestões para a adequação de ruído de fundo em ambientes fechados. Essas curvas são muito usadas para julgar a aceitabilidade dos ruídos criados por aparelhos de ventilação e outros tipos de ruído de banda larga (LONG, 2005).

Para saber à que curva um determinado ruído se adequa, é preciso medir seu nível de pressão em bandas oitavadas e comparar os resultados com as curvas. A curva à qual o ruído se adequa será aquela imediatamente superior à todos os pontos. Ou seja, todos os pontos do nível do ruído medido devem estar abaixo daquela curva cujo critério deve ser atendido.

3.5 Inteligibilidade

Em todo o mundo, há uma preocupação crescente em criar ou reformar ambientes para atingir o melhor nível de conforto acústico possível. Esse conforto acústico pode ser interpretado como uma série de características que recomenda-se que sejam satisfeitas de acordo com a aplicação do espaço a ser discutido. No projeto de salas para palestras ou salas de aulas, a habilidade de compreender a fala daquele que discursa é extremamente importante. Essa capacidade é dita como inteligibilidade e depende do efeito de mascaramento à partir de sons estranhos ao discurso que escutamos. O mascaramento pode ser causado por ruído de fundo presente no ambiente ou pelas reflexões do discurso original (LONG, 2005).

A inteligibilidade é medida como o percentual de palavras compreendidas por ouvintes treinados quando estas são recitadas por oradores também treinados. As palavras recitadas são cuidadosamente escolhidas e podem estar inseridas dentro de um contexto ou não. Palavras fora de contexto são compreendidas com mais dificuldade, mas sua compreensão aumenta com a quantidade de sílabas da palavra. Palavras dissilábicas são compreendidas até duas vezes mais facilmente que palavras monossilábicas (KINSLER et al., 1999). Na figura 24 é possível observar a influência da relação sinal-ruído na inteligibilidade. Para um acerto de 95% em sentenças, é necessário uma relação sinal-ruído

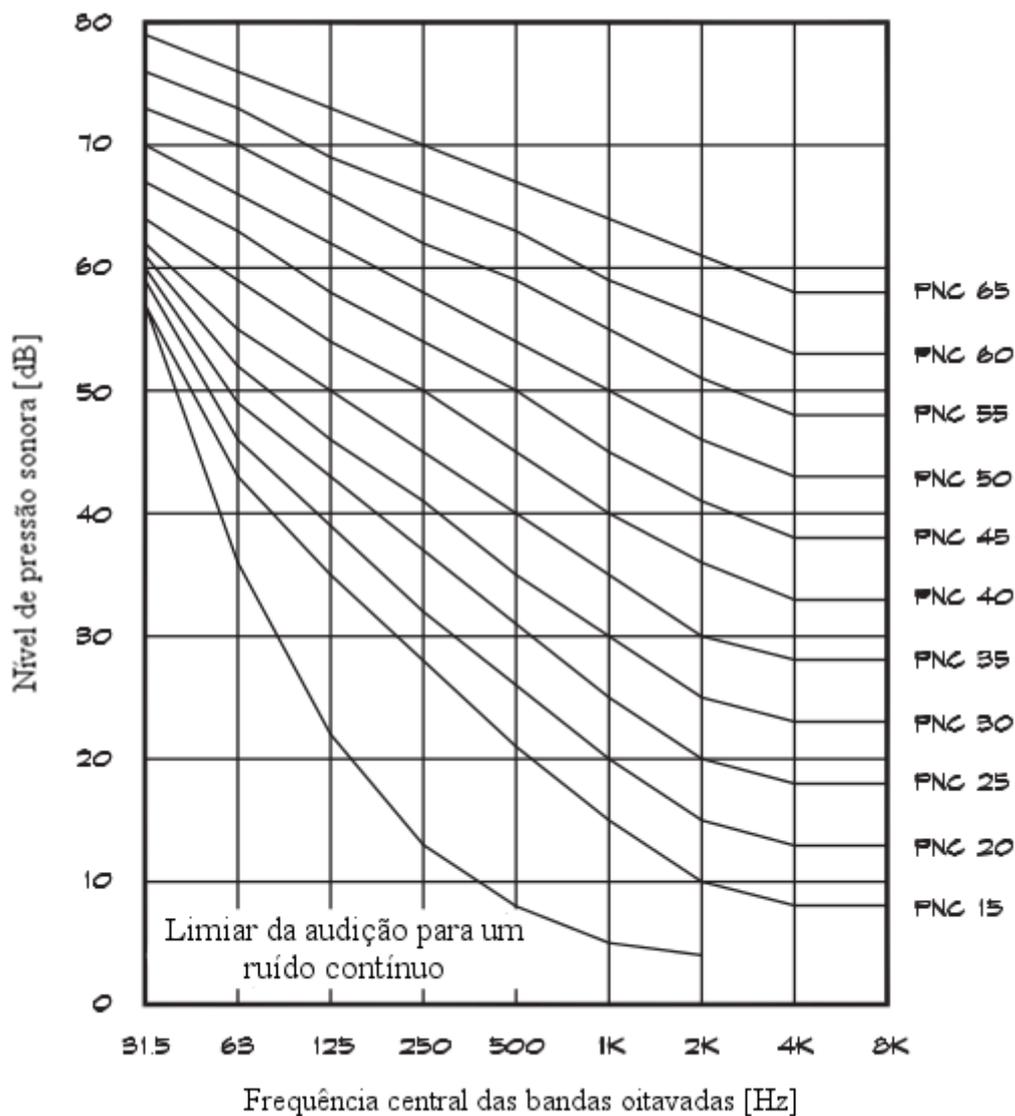


Figura 23 – Critério de Ruído: curvas desejáveis (LONG, 2005).

de 6 *dBA*, ou seja, o nível de pressão sonora da fala tem que ser duas vezes maior que o nível de pressão sonora do ruído de mascaramento.

Na figura 24, é mostrado um gráfico do nível de pressão sonora médio em função da distância em uma sala. É possível ver que sem a reverberação desse ambiente, o nível de pressão sonora nas últimas três filas de cadeira cairia drasticamente. No entanto, esse ganho no nível de pressão sonora não é necessariamente um ganho na inteligibilidade da sala. Em uma sala deste tipo, o som que chega ao ouvido do receptor é uma mistura do som direto com as reflexões que chegam atrasadas devido ao maior percurso que elas fazem. Estas reflexões chegam suficientemente atrasadas a ponto de comprometer a inteligibilidade das sílabas subsequentes causando mascaramento (BOOTHROYD, 2004). Na figura 25 há dois espectrogramas da frase "Mary had a little lamb.". No primeiro é possível ver o espectrograma desta frase sem a influência da reverberação ($T_{60} = 0,5$ s), enquanto o

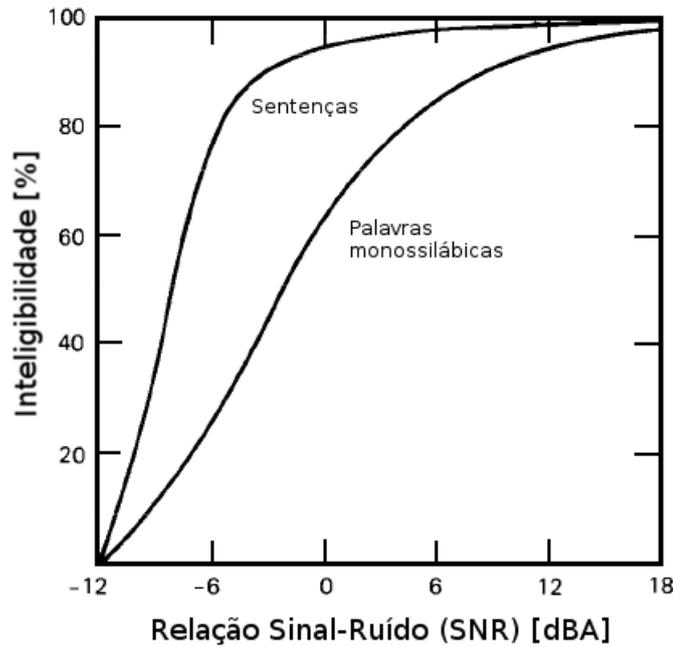


Figura 24 – A inteligibilidade em função da relação sinal-ruído (KINSLER et al., 1999).

segundo é o espectograma da mesma frase com a reverberação de um ambiente. É possível perceber que nas frequências mais baixas praticamente não há mais separação entre as sílabas pois a reverberação faz com que o som de uma sílaba percore mesmo quando outras estão sendo pronunciadas causando uma queda na inteligibilidade.

Hoje, a forma mais comum de se medir a inteligibilidade de uma sala é à partir do índice de inteligibilidade da fala, STI, e pode ser obtido à partir da resposta ao impulso ou à partir da emissão de um ruído filtrado em sete bandas oitavadas, cada banda modulada em 14 frequências diferentes, e calculando a razão do grau de modulação causado pelo ambiente. O valor final será um valor normalizado entre 0 e 1 indicando o grau de inteligibilidade conforme a figura 27 (DUNN et al., 2015).

O RASTI é um método alternativo para o cálculo do STI que envolve apenas duas bandas de ruído modulados em outras 5 frequências. Este método está descrito no padrão IEC 286-16 (DUNN et al., 2015). Seu cálculo pode ser feito com base no tempo de reverberação e no volume da sala e é obtido através das equações 3.13, 3.14 e 3.15 e da figura 26.

$$m(F) = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi F \frac{T_{60}}{13,8})^2}} \frac{1}{1 + 10^{(S/N)/10}} \quad (3.13)$$

$$(S/N)_{app} = 10 \log_{10} \left(\frac{m}{1 - m} \right) \quad (3.14)$$

$$RASTI = ((S/N)_{app} + 15)/30 \quad (3.15)$$

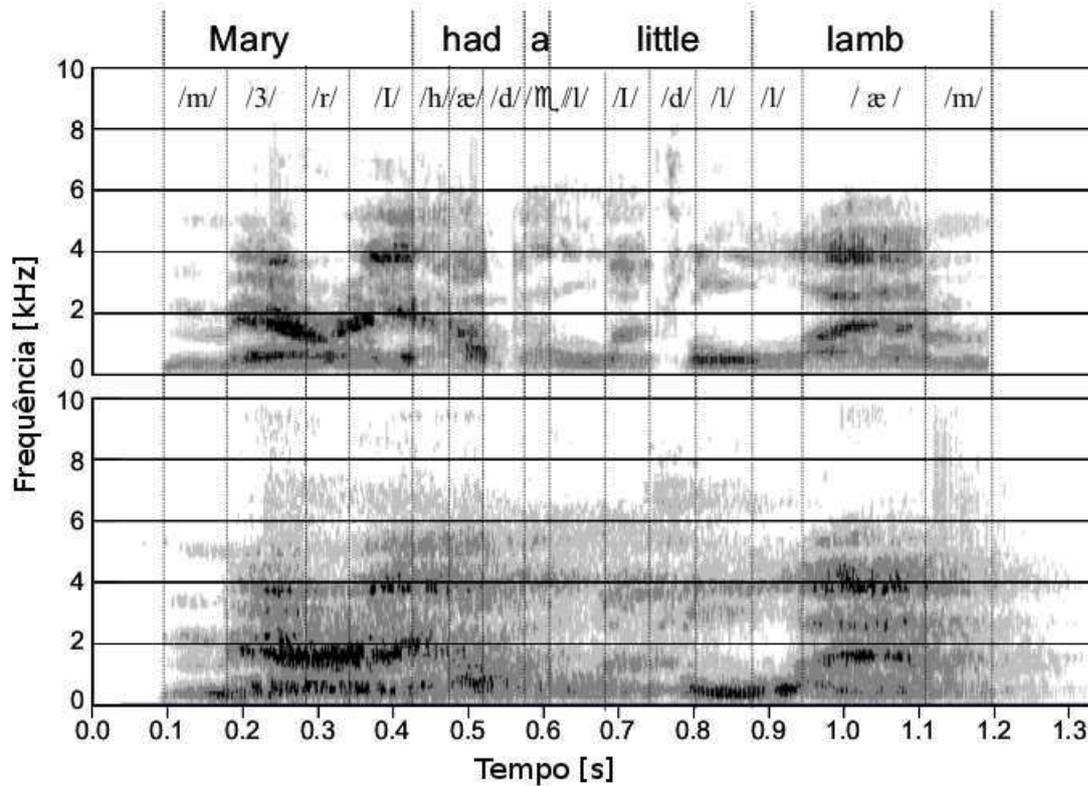


Figura 25 – Espectrograma de uma frase com e sem a influência da reverberação (BOOTHROYD, 2004).

Baseado em dados empíricos Peutz, em 1997, estabeleceu que o percentual de perdas na articulação de palavras do tipo consoante-vogal-consoante (CVC) pode ser dado como nove vezes o tempo de reverberação do ambiente (DAVIS; PATRONIS, 2014). Isso significa que na figura 25 o percentual de perda em palavras do tipo CVC é aproximadamente 4,5%. Isso somado aos 1,5% de erro residual em fonemas nos dá um erro de aproximadamente 6%, ou seja, 94% de taxa de acerto. Para termos idéia do que esses números significam, Peutz também afirmou que a inteligibilidade é ótima para perdas na articulação de até 10% e boa para perdas de até 15% para os casos em que a mensagem não é dita como de difícil compreensão (DAVIS; PATRONIS, 2014).

O índice de inteligibilidade da fala (SAI - Speech Audibility Index) é um método alternativo ao índice de transmissão da fala (STI - Speech Transmission Index) para definir a inteligibilidade de um ambiente de modo a levar em conta o ruído do ambiente e o tempo de reverberação. SAI é definido como a proporção útil do sinal da fala que está abaixo do nível de ruído efetivo (ruído mais reverberação) (BOOTHROYD, 2004).

Na figura 28 é possível ver o impacto da percepção de palavras familiares e não-familiares. Essa figura é especialmente importante pois em um ambiente como uma sala de aula as palavras que ali são ditas, são palavras geralmente desconhecidas pois estão inseridas em um ambiente de aprendizagem. Dessa forma, ambientes que satisfazem o critério de

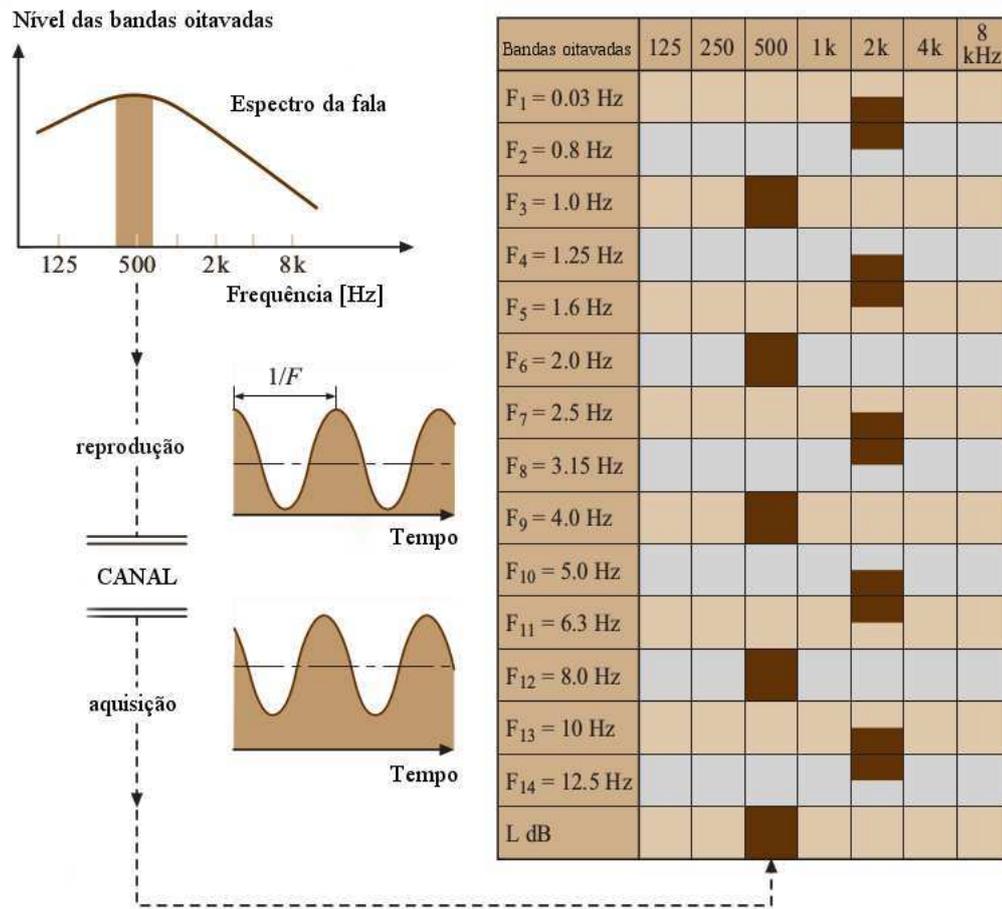


Figura 26 – Princípio de medição do RASTI (DUNN et al., 2015).

Valor do RASTI	<0.30	0.30–0.45	0.45–0.60	0.60–0.75	>0.75
Inteligibilidade	RUIM	FRACO	MÉDIO	BOM	EXCELENTE

Figura 27 – Escala dos valores obtidos para o RASTI (DUNN et al., 2015).

inteligibilidade para palavras familiares podem não ser favoráveis ao reconhecimento de palavras não-familiares. No caso mais drástico apresentado na figura, a diferença pode chegar a até 13%. Este gráfico corresponde à palavras do tipo CVC. Para o caso de palavras com mais de 3 fonemas esta diferença será ainda maior (BOOTHROYD, 2004).

Em um estudo realizado na Itália em 2012 por Astolfi et al. (ASTOLFI; BOT-TALICO; BARBATO, 2012), foram analisadas 4 salas de aula sendo que duas delas correspondem à mesma sala antes e depois de um tratamento acústico. Foram também medidos os tempos de reverberação, T_{30} , para cada sala. Foram encontrados os seguintes valores: 0,74 s na escola A, 0,87 s na escola C, 1,55 s na escola B(a) e 0,37 s na escola B(b). O sistema utilizado para fazer as medições de inteligibilidade consistiam de um simulador de busto 4128 da B&K (HATS) conectado a um computador, 8 microfones

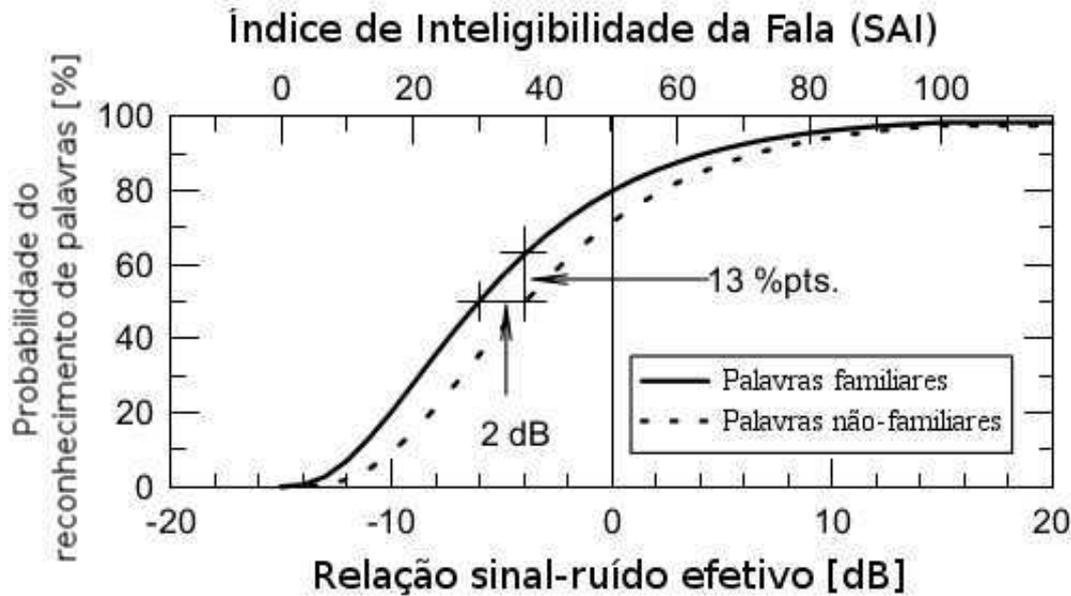


Figura 28 – Reconhecimento de palavras familiares e não-familiars do tipo CVC em função do SAI e da relação sinal-ruído efetivo (BOOTHROYD, 2004).

omnidirecionais (ECM8000) também conectados à um computador e duas fontes de ruído (uma fonte omnidirecional B&K 4296 e um alto-falante B&K 4224).

A conclusão deste experimento foi que a influência do ruído de tráfego de automóveis na perda de articulação foi diminuída de 13% para 6% com uma queda no tempo de reverberação de 1,6 s para 0,4 s. Esta mesma queda no tempo de reverberação levou à uma variação desprezível na inteligibilidade quando o ruído utilizado foi a simulação de várias conversas paralelas (ASTOLFI; BOTTALICO; BARBATO, 2012). Uma das explicações utilizadas pelo autor para justificar esse resultado é que o ruído de conversação tem uma variação de amplitude muito alta criando vários vazios que permitem o reconhecimento das palavras mesmo com um alto tempo de reverberação. Tais resultados levaram os autores à concluir que o tempo de reverberação ótimo em salas de aula ainda necessita de mais investigações, porém um baixo tempo de reverberação leva a uma maior inteligibilidade na maioria dos casos (ASTOLFI; BOTTALICO; BARBATO, 2012).

3.6 Acústica de auditórios

Uma das causas da falta de inteligibilidade em salas de aula ou auditórios é a reverberação do ambiente. Em geral, quanto mais uma sala é usada para discursos, menor deve ser seu tempo de reverberação. Para salas de aula pequenas, como regra geral, o tempo de reverberação deve ser menor ou igual à 0,8 s, e é recomendável que não varie muito em função da frequência (LONG, 2005). Um tempo de reverberação maior é desejável apenas em salas destinadas à música como pode ser visto na figura 18. Para atender a

estes critérios é recomendável que salas de aula tenham superfícies absorvedoras apenas no teto e no piso (COX; D'ANTONIO, 2009).

Para um bom projeto, também é necessário que a sala atenda à alguns critérios em relação ao ruído de fundo. Para salas de aula ou auditórios, o projeto deve atender à curva de critério de ruído NC 30 (35 dBA), ou seja, todo ruído presente na sala não deve exceder um nível máximo de 35 dBA. Este valor é recomendado para um nível de pressão sonora da voz igual à 75 dBA, medido à um metro do orador, e uma distância de até 7,6 metros entre a fonte sonora e o receptor mais distante (LONG, 2005).

Em salas um pouco maiores, de até 120 lugares, o ruído de fundo também não deve exceder a curva NC 30. Nesse tipo de sala, carpetes e portas automáticas também ajudam à diminuir o ruído causado por alunos que chegam atrasados nas aulas. Outro detalhe para este tipo de sala com capacidade para até 120 pessoas é que um teto baixo e refletivo é mais aconselhado do que um teto absorvente. Essa recomendação se dá devido à atenuação do som causada pelo número de pessoas na sala. Desse modo, é preferível que as reflexões cheguem por cima para evitar uma maior atenuação do som direto. Material absorvente deve ser colocado apenas nas paredes laterais e no fundo da sala para diminuir o tempo de reverberação do ambiente. E, para evitar ecos, as paredes ao redor do lugar onde o orador estará devem ser inclinadas. É importante lembrar que um discurso sem amplificação torna-se não-inteligível para distâncias entre 9 e 12 metros se a acústica do lugar não for cuidadosamente projetada (LONG, 2005).

Para o teto, pode-se optar entre um projeto de teto plano ou um projeto de teto com vários painéis de diferentes alturas. O projeto com teto plano possui um menor custo e propicia um ambiente acústicamente mais confortável para discussões entre os ouvintes (LONG, 2005). Na figura 29, pode-se ver um projeto típico para uma sala de até 120 lugares.

3.7 Acústica de salas de concerto

Nas salas de concerto e em teatros, o objetivo do tratamento acústico é totalmente diferente ao das salas destinadas a aulas e palestras. Neste caso, o tempo de reverberação ideal é, em geral, entre 1,5 s e 2,2 s e varia de acordo com o tipo de evento que o ambiente sediará e seu volume total como pode ser visto na figura 18. Salas destinadas à reprodução de música barroca requerem os menores tempos (entre 1,5 s e 1,7 s), música clássica requer tempos um pouco maiores (entre 1,6 s e 1,9 s) e música romântica requer os tempos mais longos (entre 1,8 s e 2,2 s). Para manter estas características de tempo de reverberação, os tetos são geralmente altos (15 m de altura) e difusos e as paredes são decoradas com colunas e afrescos que ajudam a espalhar a energia pelo ambiente (LONG, 2005).

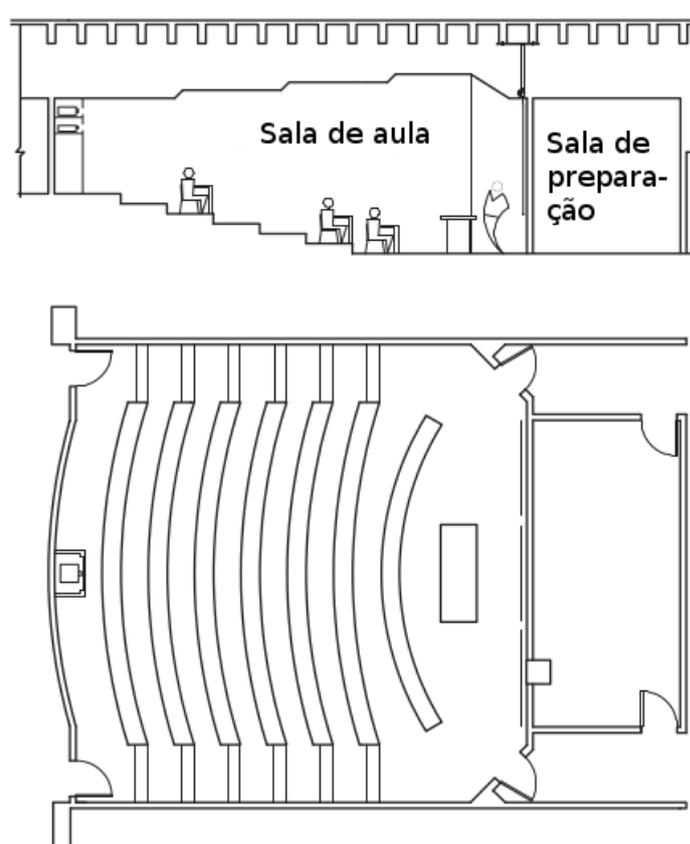


Figura 29 – Projeto da estrutura física de uma sala para até 120 lugares (LONG, 2005).

Em uma boa sala de concerto, o público deve sentir-se envolvido e rodeado pelo som por meio de reflexões laterais fortes que aumentam a sensação de espacialidade. A sala também deve proporcionar um tempo de reverberação adequado. Um aumento no tempo de reverberação para frequências abaixo de 500 Hz é desejável e dá uma sensação de um som mais caloroso. O local deve ser regulado de forma que exista clareza nas passagens de execução mais rápida (essa clareza é obtida através de superfícies refletoras próximas à fonte sonora) e a sensação de altura do som deve ser adequada e distribuída igualmente pela sala. Porém, em salas com pouco volume, essa sensação não deve ser exagerada devido à proximidade do palco com o público. Também é desejável que a sala proporcione um som fidedigno e sem coloração ao público, assim como um baixo nível de ruído (salas de concerto pequenas devem atender ao critério de ruído NC 20 e salas grandes ao NC 15) (LONG, 2005).

Apesar de existirem vários formatos de salas de concerto ainda é consenso entre os especialistas na área que as melhores salas de concerto são aquelas que possuem menos assentos e um formato retangular. Salas retangulares são chamadas de salas do tipo "caixa de sapato" e podem possuir varandas ou não. A mais famosa dessas salas está em Viena, na Áustria, e foi construída em 1870 (DUNN et al., 2015). Também podem ser encontradas salas com formato de leque, leque invertido, diamante e ferradura. A maioria

desses formatos podem ser vistos na figura 30. Salas de concerto circulares são hoje as mais preferidas pelos arquitetos devido à liberdade que esse formato proporciona na criação. Mas em 1994, Beranek (BERANEK, 1994) descreveu a sala de concertos da filarmônica de Berlin como de aparência fascinante mas de acústica inconsistente. Ele também enumerou uma série de fatores que o fez chegar a tal conclusão onde um destes fatores era a variação da sensação em função da posição que ele sentava. Em momentos que ele sentava atrás da orquestra ele escutava alguns instrumentos, cujo som deveria ser bem inferior, muito altos.

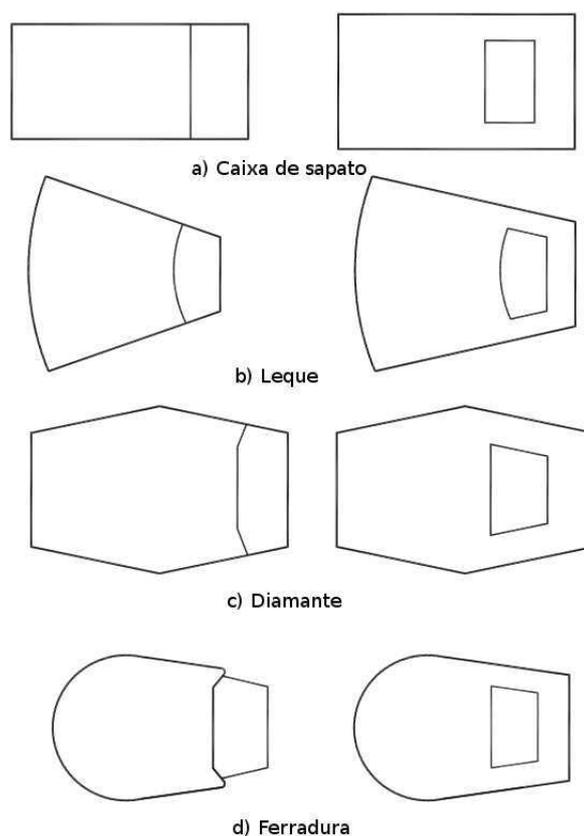


Figura 30 – Formatos típicos de salas de concerto (LONG, 2005).

No que diz respeito ao volume de uma sala de concertos, é preciso encontrar um ponto de equilíbrio entre volume do som e reverberação. Em salas menores, é necessário um maior volume por assento de modo à evitar que o volume seja muito alto na plateia e em grandes salas a tendência é que se tenha um menor volume por assento. No entanto, há uma grande variedade de volumes por assento que levaram à bons resultados em salas de concerto (LONG, 2005).

Nas paredes das salas de concerto o gesso é o material mais utilizado podendo ser aplicado diretamente sobre o concreto. Quanto mais fina a camada de gesso e mais rígida a estrutura à qual o gesso foi aplicado, menor a absorção em baixas frequências. Madeira também é um material bastante encontrado em salas de concerto mas precisam ser painéis de pelo menos 25 mm de espessura aplicados sobre uma superfície rígida para que seu

coeficiente de absorção seja relativamente baixo em baixas frequências (LONG, 2005).

Para o piso, pode ser usado concreto ou madeira sobre concreto. Quando o piso é feito em concreto, aconselha-se o uso de um carpete fino para evitar sons originados pelo choque entre o piso e o calçado (LONG, 2005).

Uma grande fonte de preocupação em grandes salas de concerto é a quantidade de absorção da audiência. Em salas cujo projeto não leva em conta o coeficiente de absorção do corpo humano a variação no som da sala durante o ensaio e a apresentação de uma orquestra pode ser drástica. Na maioria dos casos, são usados assentos cujo coeficiente de absorção é muito parecido com o coeficiente de absorção do corpo humano. Dessa forma, a variação no tempo de reverberação é mínima mesmo que a sala esteja vazia ou totalmente ocupada (LONG, 2005).

A construção do palco segue a lógica de que quanto menor o palco, geralmente melhor o som. Beranek recomenda que o palco tenha aproximadamente $1,9 m^2$ de área por músico enquanto que outros autores recomendam valores bastante variados. O material usado é sempre madeira devido à ressonância que a madeira produz e que faz com que o som volte do chão para os músicos. No entanto, se a madeira for muito fina ela vira um material absorvente e se for muito espessa ela não vai vibrar. A sugestão é que a madeira tenha aproximadamente $22 mm$ de espessura (LONG, 2005).

Em relação à altura ideal do palco, alguns autores defendem que deve ser logo abaixo da altura dos olhos de um ouvinte sentado. Dessa forma, evita-se a atenuação das altas frequências pela platéia, ao colocar a fonte mais alta que o público, e as reflexões laterais são favorecidas (LONG, 2005).

Parte II

Procedimentos Experimentais

4 Materiais utilizados

Para este trabalho, foi utilizado um microfone da marca Behringer e modelo ECM8000, uma caixa de som passiva, uma mesa de mistura da marca Behringer[®] e modelo Xenyx 1204USB, um medidor de nível de pressão sonora da marca AKROM[®] e modelo KR833, um computador e o software MatLAB[®] em conjunto com o pacote ITA-toolbox¹.

O microfone ECM8000 é um microfone de medição utilizado largamente em várias pesquisas na área de acústica. Ele é do tipo condensador com um transdutor de eletreto (12,7 mm de diâmetro) e resposta espacial omnidirecional como pode-se observar na parte esquerda da figura 31. Por ser um microfone de medição, ele foi desenvolvido para apresentar uma curva de resposta em frequência aproximadamente linear, ou seja, uma resposta que não altere a natureza do som que está sendo gravado. O gráfico da resposta em frequência do microfone pode ser visto na parte direita da figura 31. Todas as características do microfone estão em conformidade com a ISO 3382.

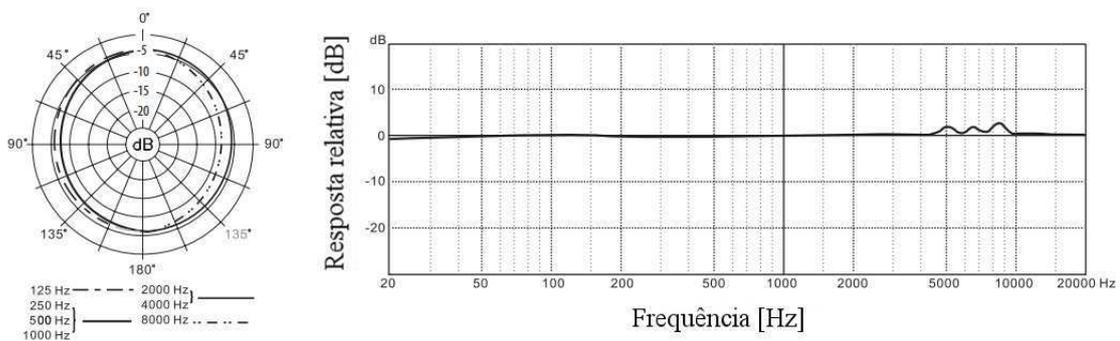


Figura 31 – Resposta espacial e resposta em frequência do microfone de medição ECM8000.

A caixa utilizada durante as medições foi montada pelo professor Dr. José Ewerton e é uma caixa de apenas duas vias onde o maior falante é o modelo 6TR6A Triaxial de 6 polegadas, com potência de $60 W_{rms}$, da marca JBL[®] e o *tweeter* é da marca Leson[®] e modelo TLX-2 com potência igual a $40 W_{rms}$. Esta caixa foi utilizada em ambas as medições e possui resposta satisfatória em frequências a partir de 60 Hz.

A mesa de mistura Xenyx 1204USB foi utilizada como um conversor analógico-digital responsável por enviar o sinal da resposta ao impulso às caixas e digitalizá-lo após a captação do microfone ECM8000. Todas as medições foram feitas com uma taxa de amostragem de 48.000 amostras por segundo e 16 bits de resolução por amostra.

¹ <http://www.ita-toolbox.org>



Figura 32 – Equipamentos utilizados no auditório da UAAMI.



Figura 33 – Equipamentos utilizados na sala de aula do CAA.

Todo o processamento do sinal sonoro gravado e a criação do sinal de referência foram feitos à partir do software MatLAB[®] utilizando o pacote ITA-toolbox. O ITA-toolbox é um pacote de código aberto que foi desenvolvido em 2008 por alunos e pesquisadores do instituto de acústica técnica da universidade de Aachen na Alemanha. Este pacote reúne rotinas e sinais que são comuns na análise de dados para acústica de modo a facilitar o processamento de sinais e a obtenção de parâmetros para pesquisadores desta área. Os pesquisadores responsáveis pelo projeto garantem que o pacote atende as exigências da IEC 61260.

5 Características dos ambientes medidos

A sala 102 do bloco CAA no campus Campina Grande da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) é uma das salas de aula mais recentes em todo o campus. O bloco foi inaugurado em 2011 pelo então reitor Thompson Mariz e conta com 24 salas de aula sendo oito delas com capacidade para 110 alunos. A sala medida foi uma das salas com capacidade para 110 alunos e cujo esboço da planta pode ser visto na figura 34. A sala possui o chão inteiramente feito em concreto com acabamento em cimento queimado, paredes de alvenaria com acabamento simples, teto de concreto com acabamento simples, cadeiras de madeira sem acolchoamento, 4 janelas de vidro de $2,96 \times 1,38 \text{ m}$ cada e 3 janelas de $0,7 \times 3,28 \text{ m}$ cada. Através da análise dos materiais da sala, é possível perceber que o único material absorvente ali presente são os próprios alunos e o professor em dia de aula, ou seja, nenhuma preocupação foi esboçada na escolha dos materiais da sala para propiciar um maior conforto acústico. A sala ainda conta com uma plataforma para elevar a altura do professor e vários níveis para elevar a altura das cadeiras dos alunos de modo que eles consigam manter contato visual com o professor apesar do tamanho da sala. Seu volume total é de 376 m^3 , as paredes possuem uma área superficial total de $114,8 \text{ m}^2$, o chão possui uma área superficial de $170,83 \text{ m}^2$ e o teto possui uma área de $163,4 \text{ m}^2$.

O auditório da Unidade Acadêmica de Arte e Mídia (UAAMI) é uma sala usada para aulas, para práticas em grupo, pequenos recitais e eventos e possui uma capacidade para 100 pessoas. As paredes do auditório possuem um acabamento em tijolo aparente, chão feito em concreto e acabamento em cimento queimado, teto em concreto com acabamento simples, 11 janelas de vidro de $0,6 \times 0,7 \text{ m}$ cada, uma seção de parede feita em tijolo de vidro de $2,84 \times 2,2 \text{ m}$ e outra seção em tijolo de vidro de $1,81 \times 2,2 \text{ m}$. A sala ainda conta com um palco elevado feito em madeira, diferentes níveis para os assentos e cadeiras acolchoadas. O auditório ainda possui uma sala ao fundo e 3 portas de madeira sendo duas delas para o exterior do auditório. O auditório possui um volume total de $412,5 \text{ m}^3$, as paredes possuem uma área total de $149,5 \text{ m}^2$, a parte em concreto do chão possui uma área superficial de $115,3 \text{ m}^2$, o palco possui uma área de $28,26 \text{ m}^2$ e o teto possui uma área de $130,6 \text{ m}^2$. Os coeficientes de absorção de todos os materiais encontrados nas salas podem ser encontrado na tabela 3.

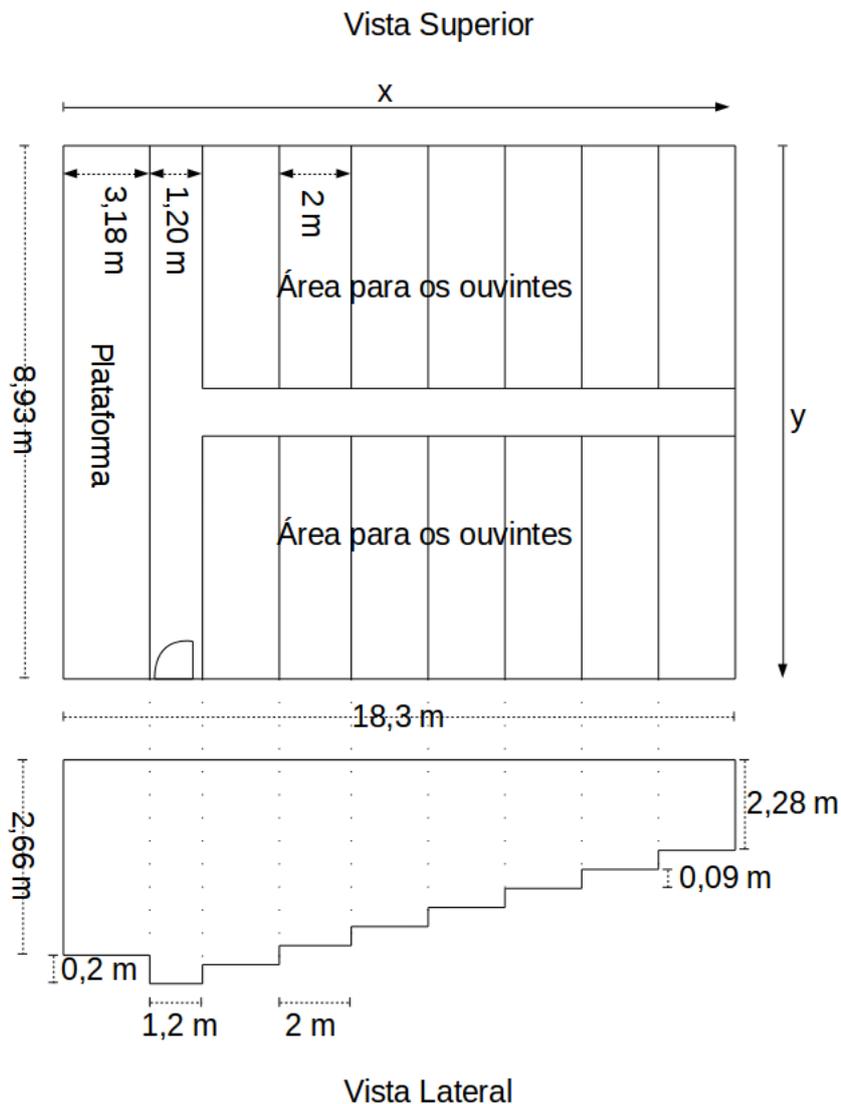


Figura 34 – Representação da planta da sala de aula do bloco CAA da UFCG.

Tabela 3 – Coeficiente de absorção dos materiais encontrados nas salas medidas (COX; D'ANTONIO, 2009).

Material	Frequência (Hz)					
	125	250	500	1.000	2.000	4.000
Chão em concreto esmaltado	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Plataforma de madeira	0,4	0,3	0,2	0,17	0,15	0,1
Tijolo pintado	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Tijolo com acabamento e pintura	0,05	0,04	0,02	0,04	0,05	0,05
Concreto com acabamento e pintura	0,1	0,05	0,06	0,07	0,09	0,08
Janela de vidro comum	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Cadeira de madeira ocupada (1/m ²)	0,16	0,24	0,56	0,69	0,81	0,78
Assento de teatro ocupado	0,41	0,58	0,8	0,9	0,92	0,89
Assento acolchoado desocupado	0,44	0,6	0,77	0,89	0,82	0,7

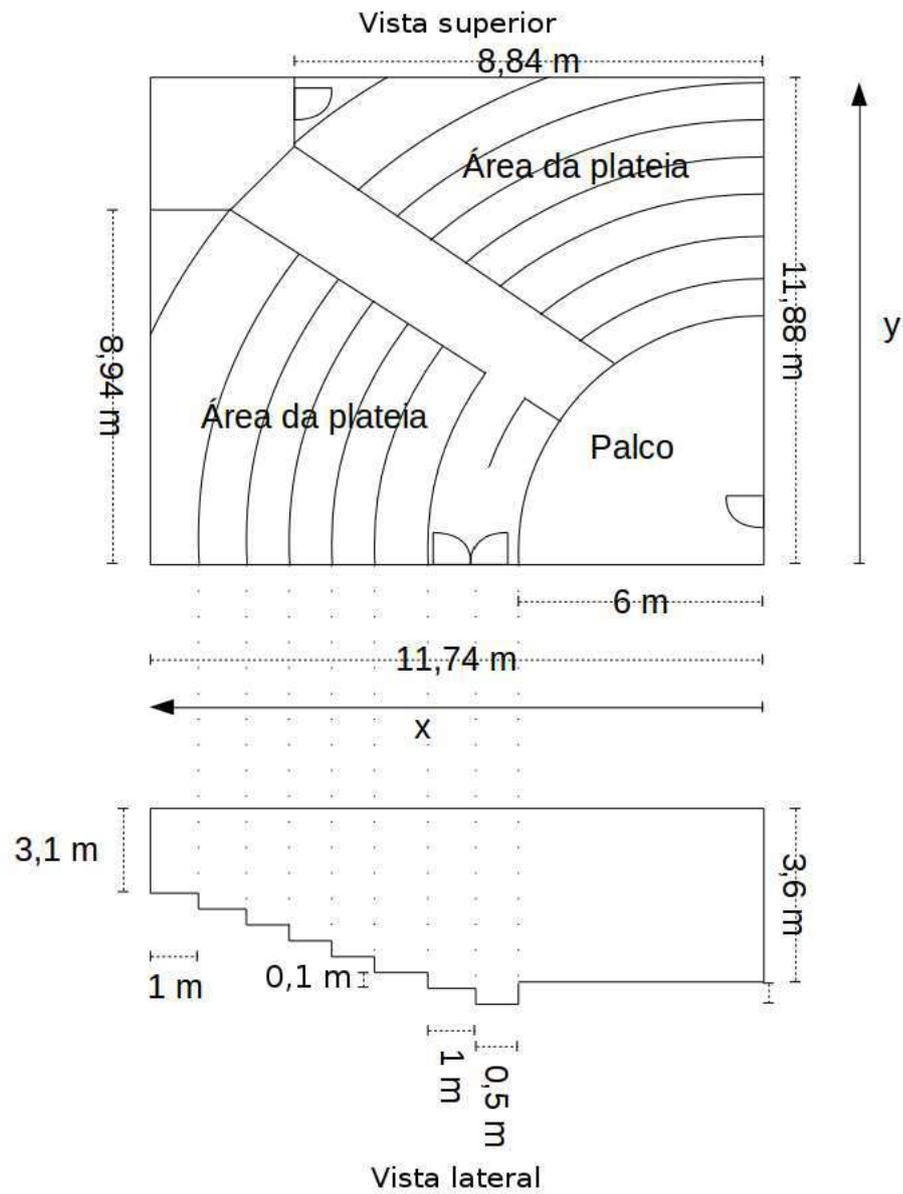


Figura 35 – Representação da planta do auditório da UAAMI.

6 Medição dos parâmetros acústicos

6.1 ISO 3382

Os parâmetros acústicos de uma sala são extraídos da resposta ao impulso da sala. Mas, por definição, a resposta ao impulso é impraticável pois é a resposta da sala a um impulso de amplitude infinita e largura infinitesimal. Para fins de facilitar essas medições e de regulamentar como elas devem ser feitas, surgiram vários métodos e normas. Entre essas normas, a mais importante é a ISO 3382-1 (ISO, 2009) que regula como essas medições devem ser feitas, que tipo de fonte e o tipo de microfone que deve ser usado para ambientes cuja precisão dos valores obtidos deve ser a maior possível, como em salas de concerto.

Segundo a norma ISO 3382-1, a fonte sonora e o microfone tem que ser o mais omnidirecional possível. Porém, nem sempre isto é aplicável pois requer equipamento de baixa portabilidade e alto custo, como é o caso do dodecaedro na figura 36, ou uma fonte de impacto que tenha uma resposta similar a um impulso (pistola ou balão especial). O problema de se utilizar uma fonte sonora como um balão é a questão da baixa repetibilidade desse método. De acordo com o volume de ar e a pressão interna do balão, as respostas em baixa frequência e a direcionalidade do balão podem variar bastante e, segundo um estudo feito por Patynen et al. (PÄTYNEN; KATZ; LOKKI, 2011), não satisfaz a diretividade requerida pela ISO 3382 em baixas frequências. No caso da pistola, o mais recomendado é que ela tenha um calibre de 38 *mm* segundo Lamote e Bradley (LAMOÏHE; BRADLEY, 1985) em um estudo feito sobre o uso de pistolas para medir respostas impulsivas de salas. A pistola e o dodecaedro são as duas fontes sonoras mais utilizadas por pesquisadores da área.

Os equipamentos exigidos pela norma são equipamentos cuja obtenção requer um alto investimento. Mas, para salas comuns onde não há uma preocupação excessiva com a precisão da medição, não é necessário que a norma seja satisfeita com rigor. Para o trabalho aqui desenvolvido, a norma ISO 3382-1 não foi satisfeita por diversos motivos, entre eles a falta de equipamentos e o tamanho das salas medidas. No entanto, a medição foi feita conforme exigido na norma, em números de medições e processamento do sinal, mas não satisfazendo as exigências de diretividade e nível de pressão sonora.

As medições realizadas na sala de aula e na sala de recitais foram feitas de formas muito similares, como pode ser visto nas figuras 32 e 33. A fonte sonora foi colocada no centro da plataforma ou palco, no mesmo lugar onde a fonte sonora costuma estar durante o uso das salas, e a uma altura de aproximadamente 1 *m*. O microfone foi posicionado a uma distância mínima de 2 *m* da fonte sonora e os pontos de medição foram decididos



Figura 36 – Dodecaedro: fonte sonora omnidirecional composta por 12 alto falantes (KUTRUFF, 2009).

aleatoriamente. Para a sala de aula, foram utilizados 8 pontos de medição devido ao seu tamanho e, para a sala de recitais, foram utilizados apenas 5 pontos de medição. Em ambos os casos, procurou-se definir os locais de medição da forma mais aleatória possível e a uma distância aproximadamente igual entre os pontos. Também foi variada a altura do microfone de forma a tentar extrair valores mais fiéis dos parâmetros das salas. É importante lembrar que as medições foram realizadas com a sala desocupada e, por esse motivo, há uma diferença nos valores para quando a sala está ocupada. O diagrama da montagem pode ser visto na figura 37.

6.2 Varredura de seno

O método utilizado para a medição das características foi a varredura de seno, onde a fonte sonora emite o som de um seno que pode variar exponencialmente ou linearmente com o tempo, dependendo apenas do método utilizado. A varredura de seno linear (LSS) pode ser descrito matematicamente como

$$s(t) = \text{sen}[\theta(t)] = \text{sen}\left(\omega_1 t + \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_{total}} \times \frac{t^2}{2}\right) \quad (6.1)$$

onde ω_1 e ω_2 são respectivamente a frequência angular inicial e final da medição (20 Hz à 20 kHz) e t_{total} é a duração total da medição. É possível perceber que a variação da frequência do sinal é uma variação linear. No entanto, esse método leva a uma baixa

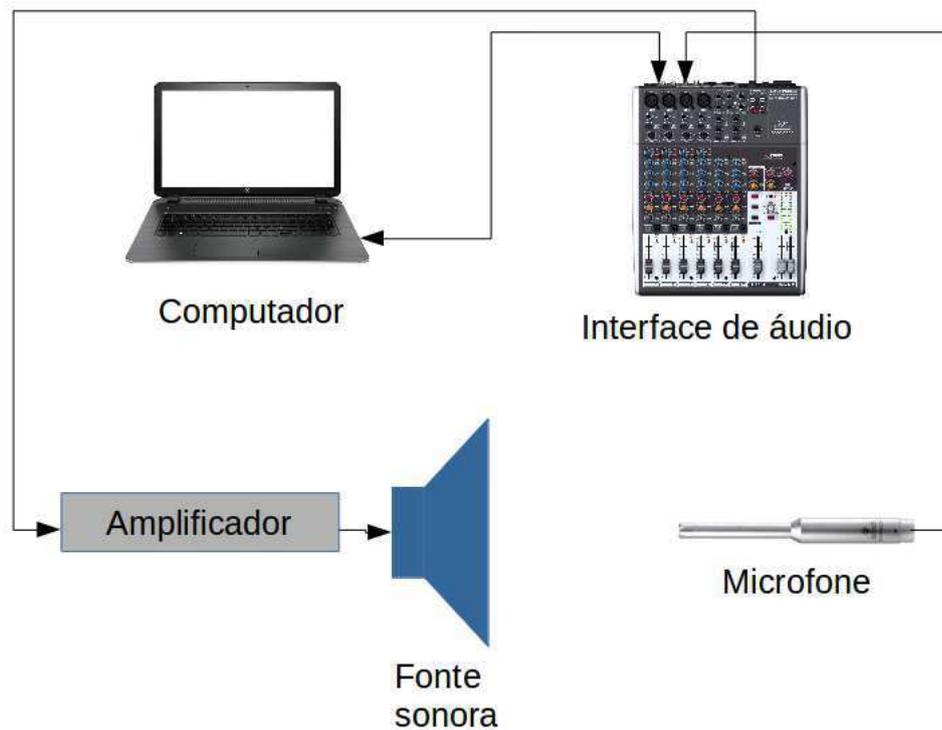


Figura 37 – Diagrama da montagem dos equipamentos durante as medições.

relação sinal-ruído ao contrário da varredura de seno exponencial (ESS) (MENG et al., 2008).

O ESS pode ser definido matematicamente por

$$s(t) = \text{sen}[\theta(t)] = \text{sen} \left[\frac{t_{total}\omega_1}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \times \left(\exp^{\frac{t}{L}} - 1 \right) \right] \quad (6.2)$$

onde L é igual a

$$L = \frac{t_{total}}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \quad (6.3)$$

Algumas recomendações foram feitas por Guigorzi et al. (GUIDORZI et al., 2015) em um estudo sobre o ESS. Neste estudo ele enfatiza a baixa robustez do ESS contra ruídos tonais e ruídos de impacto. Em caso de um deles acontecerem durante as medições, é extremamente recomendável que seja feita outra medição no mesmo lugar e que a anterior seja anulada. Isso se dá devido a picos que surgem na resposta impulsiva quando estes tipos de ruído aparecem nas medições. Para este trabalho, todos os parâmetros extraídos foram obtidos através do método de varredura de seno exponencial.

6.3 Posição das medições

As posições das medições feitas na sala de aula e no auditório podem ser vistos nas tabelas 4 e 5. Os valores em x e y são referências às figuras 34 e 35 onde, a partir destes valores, é possível identificar a posição do microfone na sala. Nas tabelas o valor de h corresponde à altura que o microfone estava posicionado.

Tabela 4 – Posição das medições realizadas na sala de aula do CAA.

<i>Posição</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>h (m)</i>
1	4,25	0,01	1,5
2	8,58	4,87	1,5
3	5,6	1,98	1,5
4	7,33	7,43	1,18
5	3,9	6,34	1,08
6	2,14	7,62	1,1
7	8	2,02	1,29
8	10,7	4,85	1,34

Tabela 5 – Posição das medições realizadas no auditório da UAAMI.

<i>Posição</i>	<i>x (m)</i>	<i>y (m)</i>	<i>h (m)</i>
1	7,81	7,76	1,3
2	10,75	4,28	1,3
3	8,19	4,43	1,16
4	3,95	6,72	1,1
5	4,48	9	1,25

Parte III

Resultados

7 Sala de aula (CAA)

7.1 Parâmetros acústicos

Os parâmetros acústicos obtidos durante as medições na sala de aula do CAA podem ser vistos nas tabelas 6, 7 e 8. Para os valores do T_{20} e T_{30} há algumas células que estão vazias devido a uma relação sinal-ruído insuficiente para medir o parâmetro. Isso fica ainda mais evidente no T_{30} onde não foi possível medir o tempo da queda de 30 *dB* em alguns pontos. Devido a esse fato, os valores utilizados para prever o tempo de reverberação após a instalação de um tratamento acústico serão os valores obtidos para o T_{20} .

Tabela 6 – Valores obtidos na medição do EDT em segundos.

<i>Freq. (Hz)</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>Média</i>
16									
31.5	0,44		0,41						0,43
63	2,37	3,57	2,68	2,8		3,52	2,4	2,69	2,69
125	2,67	2,7	2,68	3,13	3,44	2,4	2,91	2,47	2,69
250	3,01	2,8	3,02	2,98	2,79		3,11	3,22	3,01
500	2,72	2,28			2,31	2,57			2,44
1.000	2,64	2,39	2,59	2,63	2,48	2,47	2,49	2,59	2,54
2.000	2,02	2,11	2,15	2,21	2,11	2,13	2,3	2,05	2,12
4.000	1,35	1,34	1,52	1,5	1,57	1,46	1,47	1,32	1,46
8.000	1,05	0,98	1,15	1,09	1,11	0,98	1,09	0,92	1,07
16.000	0,63	0,58	0,63	0,43	0,59	0,59	0,44	0,41	0,58

Tabela 7 – Valores obtidos na medição do T20 em segundos.

<i>Freq. (Hz)</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>Média</i>
16									
31.5									
63	3								3
125	2,52	2,44	2,72	2,46	2,74	2,82	2,43	2,51	2,51
250	2,35	2,08	2,38	2,08	2,45		2,21	2,1	2,21
500	1,81	1,85			1,86	1,73			1,83
1.000	1,62	1,67	1,52	1,61	1,56	1,61	1,57	1,47	1,59
2.000	1,46	1,27	1,28	1,21	1,35	1,22	1,27	1,27	1,27
4.000	0,88	0,82	0,77	0,76	0,81	0,88	0,72	0,78	0,79
8.000	0,67	0,69	0,7	0,68	0,7	0,68	0,67	0,66	0,68
16.000		0,45	0,45			0,42		0,45	0,45

Tabela 8 – Valores obtidos na medição do T30 em segundos.

<i>Freq. (Hz)</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	<i>Média</i>
16									
31.5									
63									
125									
250		1,56							1,56
500	1,39	1,46			1,5	1,36			1,43
1.000			1,24	1,19			1,24		1,24
2.000								1,03	1,03
4.000	0,73	0,67	0,64	0,57	0,62	0,66	0,56	0,63	0,64
8.000	0,57	0,57	0,6	0,54	0,57	0,56	0,53	0,55	0,53
16.000		0,36	0,38			0,34		0,37	0,37

7.2 Análise dos resultados

De acordo com a figura 18, o tempo de reverberação sugerido para uma sala de aula com um volume de $376 m^3$ fica entre $0,6 s$ e $0,8 s$ em contraste com o tempo de reverberação de $1,83 s$ e um EDT de $2,44 s$ medidos na sala de aula do bloco CAA. Caso a sala seja totalmente ocupada, serão adicionados $24 Sabins$ de área absorvente levando o tempo de reverberação a cair para $1,06 s$. Porém, essa expectativa não corresponde à realidade pois as salas raramente são utilizadas com 100 alunos. Um cálculo mais real com apenas 30 alunos na sala leva a um tempo de reverberação de $1,5 s$. Dessa forma, constata-se que o tempo de reverberação para este ambiente está muito maior do que o esperado para um ambiente com este tamanho.

Em relação aos modos da sala, a frequência de Schroeder obtida foi $f_s = 139 Hz$. A sala não é uma sala retangular e, por esse motivo, não é possível calcular os modos da sala utilizando as fórmulas aqui expostas. Porém, a extensão média do espectro de frequência da voz masculina vai de $100 Hz$ e $8 kHz$ enquanto que a voz feminina tem uma extensão que vai de $250 Hz$ a $8 kHz$. Dessa forma, os modos não terão grande efeito sobre a propagação do som da voz na sala.

Para corrigir o problema da sala em relação à inteligibilidade, faz-se necessário diminuir o tempo de reverberação para $0,7 s$ com o uso de materiais absorventes. A instalação do material absorvente diminuirá drasticamente o nível de pressão sonora do ruído de fundo (ruído + reverberação) mas não será suficiente para corrigir a inteligibilidade devido a distância da última fila de cadeiras para o orador. Dessa forma, será necessário também um sistema de amplificação para que todos os alunos tenham capacidade de entender o discurso do professor mesmo que estejam nas últimas filas da sala.

8 Auditório (UAAMI)

8.1 Parâmetros acústicos

Os valores dos parâmetros acústicos obtidos no auditório da UAAMI pode ser vistos nas tabelas 9, 10 e 11. Nesta sala, os problemas devido a baixa relação sinal-ruído foram bem menores e os valores obtidos tanto para o T_{30} quanto para o T_{20} são válidos para a análise.

Tabela 9 – Valores obtidos na medição do EDT em segundos.

<i>Freq. (Hz)</i>	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
16						
31.5						
63	0,98	1,17	0,89			0,98
125	1,21	1,5	1,08	1,12	1,04	1,12
250	0,9	1,3	0,87	0,92	1,23	0,92
500	0,85	0,99	0,86	0,97	0,91	0,91
1.000	0,78	0,93	0,92	1,07	0,89	0,92
2.000	0,59	1,02	0,87	0,94	0,95	0,94
4.000	0,72	0,98	1	0,97	0,91	0,97
8.000	0,53	0,81	0,9	0,81	0,81	0,81
16.000	0,26	0,52	0,57	0,65	0,43	0,52

Tabela 10 – Valores obtidos na medição do T20 em segundos.

<i>Freq. (Hz)</i>	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
16						
31.5						
63						
125	1,24	1,4	1,45	1,54	1,79	1,45
250	1,1	1,12	1	1,43	1,09	1,1
500	0,94	0,91	1,04	0,87	0,90	0,91
1.000	0,89	0,96	0,95	0,92	0,93	0,93
2.000	0,95	0,91	0,90	0,92	0,99	0,92
4.000	0,74	0,73	0,74	0,78	0,74	0,74
8.000	0,65	0,60	0,63	0,68	0,66	0,65
16.000	0,36	0,38	0,44	0,44	0,43	0,43

8.2 Análise dos resultados

Por se tratar de uma sala com várias finalidades, é difícil determinar que tipo de projeto deve ser feito para ela. Porém, este auditório é, em grande parte do seu tempo,

Tabela 11 – Valores obtidos na medição do T30 em segundos.

<i>Freq. (Hz)</i>	1	2	3	4	5	<i>Média</i>
16						
31.5						
63						
125	1,28	1,37	1,45			1,37
250	1,11	1,17	1,02	1,35	1,11	1,11
500	1,03	0,97	1,05	0,96	0,94	0,97
1.000	0,89	0,95	0,92	0,92	0,95	0,92
2.000	0,98	0,89	0,91	0,91	0,94	0,91
4.000	0,67	0,63	0,64	0,67	0,64	0,64
8.000	0,59	0,53	0,55	0,60	0,56	0,56
16.000	0,35					0,35

utilizado para fins de reprodução de música. Ou seja, ele é usado como uma sala de concertos na maioria das vezes. Por se tratar de uma sala pequena, onde o ouvinte fica muito próximo do locutor, não haverá problemas de inteligibilidade haja visto que o som direto sempre será suficientemente maior que o som reverberante. De acordo com a figura 18, o tempo de reverberação ideal para uma sala de concertos de $412,5 m^3$ está na faixa entre $1,2 s$ e $1,4 s$ em contraste com o valor de $0,97 s$ obtido por meio de medições e, por possuir cadeiras acochoadas, o tempo de reverberação deve mudar muito pouco caso a sala seja ocupada. Isso significa que a sala possui muita superfície absorvente. Mas o baixo tempo de reverberação deve-se principalmente ao seu tamanho reduzido se comparado com salas de concerto convencionais.

Em relação aos modos, esta sala também possui um arranjo que torna difícil o cálculo dos modos por não ser totalmente retangular. Mas, pode-se ainda analisar a frequência de Schroeder para descobrir até onde deve-se ter preocupação com os modos. Para esta sala, a frequência de Schroeder obtida foi $f_s = 96,98 Hz$. Caso a sala fosse usada unicamente para discursos, não haveria problema algum. Mas instrumentos podem chegar a frequências tão baixas quanto $25 Hz$ como é o caso do piano. Ou seja, os modos da sala podem comprometer a experiência do ouvinte em frequências até $97 Hz$.

Um outro problema que pode ser visto a partir de uma breve análise da sala é que suas reflexões tendem a retornar ao palco devido ao modo como suas paredes foram arranjadas como pode ser visto na figura 38. Isto é um defeito acústico chamado foco e que acontece em salas que possuem uma estrutura que foge do convencional e que, durante a fase de projeto, não tiveram o devido cuidado. Este foco no palco pode levar a um problema de retorno caso haja necessidade de usar amplificação na sala.

Para esta sala não cabe a colocação de mais material absorvente. Em vez disso, o uso de difusores seria bastante benéfico a fim de evitar que os modos tenham um maior efeito na sala e para diminuir o retorno das reflexões em direção ao palco. Isso causará

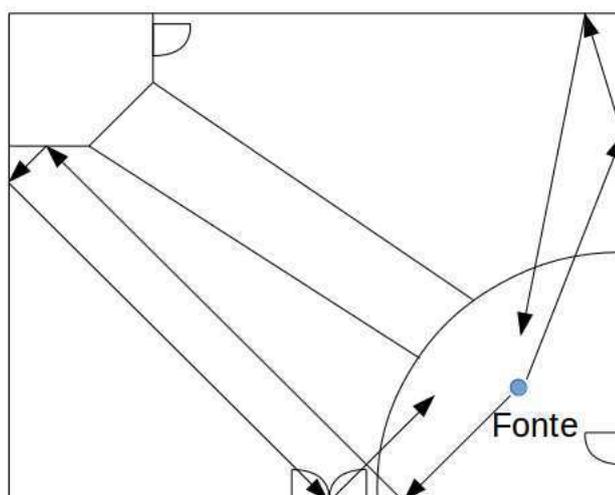


Figura 38 – Retorno das reflexões da sala ao palco.

uma sensação de envolvimento muito maior além de garantir que todos os ouvintes tenham uma sensação acústica mais homogênea.

9 Conclusão

Por se tratar de uma sala destinada ao ensino, a sala do CAA necessita de um maior cuidado quanto a sua acústica. Para diminuir o tempo de reverberação de 1,5 s (30 alunos) para 0,7 s seria necessário o uso de 67 m² da espuma absorvente modelo Sonique Wave 75/30 vendida pela marca Vibrasom¹. Essa espuma deverá ser distribuída igualmente entre as paredes laterais e a parede do fundo da sala. Porém, somente um tratamento acústico ainda não será necessário para resolver o problema da sala pois os alunos mais ao fundo podem chegar a mais de 15 m de distância do orador quando apenas 9 m já seria o suficiente para tornar uma voz sem amplificação incompreensível. Para garantir que a inteligibilidade da sala seja atendida, é necessário que seja instalado um sistema de amplificação distribuído, ou seja, com alto falantes em formato de arandelas distribuídos ao longo da sala.

Para o caso do auditório da UAAMI, não deve ser empregado qualquer tipo de material absorvente. Por já possuir um tempo de reverberação baixo o suficiente, mais material absorvente só deixaria a sala menos convidativa para práticas musicais. Para resolver o problema das reflexões e diminuir o efeito dos modos, é necessário o emprego de difusores nas paredes ao fundo da sala. Esses difusores devem ser calculados de modo que tenham a resposta mais ampla possível já que o interesse é em espalhar não só as baixas frequências, devido aos modos da sala, mas também diminuir a reflexão das frequências mais altas em direção ao palco.

Esse trabalho evidencia um problema recorrente: construções onde a função acústica do ambiente é relegada durante as fases de projeto e de execução da obra. Especificamente, ambientes destinados a função ensino-aprendizagem devem proporcionar compreensão clara para a voz humana em todos os lugares. No caso de salas de recitais, diversos outros requisitos acústicos são necessários para possibilitar uma experiência prazerosa aos usuários, além de uma boa avaliação subjetiva por parte dos profissionais (ou futuros profissionais) que as utilizam.

¹ <http://www.vibrasom.ind.br/>

Referências

- ASTOLFI, A.; BOTTALICO, P.; BARBATO, G. Subjective and objective speech intelligibility investigations in primary school classrooms. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 131, n. 1, p. 247–257, 2012. Citado 5 vezes nas páginas 15, 55, 56, 61 e 62.
- BALLOU, G. *Handbook for sound engineers*. [S.l.]: Taylor & Francis, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 15, 39 e 45.
- BERANEK, L. L. The acoustical design of concert halls. *Building Acoustics*, SAGE Publications, v. 1, n. 1, p. 3–25, 1994. Citado na página 65.
- BOOTHROYD, A. Room acoustics and speech perception. In: COPYRIGHT© 2004 BY THIEME MEDICAL PUBLISHERS, INC., 333 SEVENTH AVENUE, NEW YORK, NY 10001, USA. *Seminars in Hearing*. [S.l.], 2004. v. 25, n. 02, p. 155–166. Citado 7 vezes nas páginas 15, 16, 44, 58, 60, 61 e 62.
- COX, T. J.; D'ANTONIO, P. *Acoustic absorbers and diffusers: theory, design and application*. [S.l.]: Crc Press, 2009. Citado 7 vezes nas páginas 15, 17, 52, 53, 54, 63 e 72.
- DAVIS, D.; PATRONIS, E. *Sound system engineering*. [S.l.]: CRC Press, 2014. Citado na página 60.
- DUNN, F. et al. *Springer handbook of acoustics*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado 12 vezes nas páginas 15, 16, 41, 42, 43, 48, 49, 51, 52, 59, 61 e 64.
- EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *The master handbook of acoustics*. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2001. v. 4. Citado 4 vezes nas páginas 15, 42, 43 e 48.
- GELFAND, S. A. *Hearing: An introduction to psychological and physiological acoustics*. [S.l.]: CRC Press, 2016. Citado 5 vezes nas páginas 15, 30, 31, 32 e 33.
- GUIDORZI, P. et al. Impulse responses measured with mls or swept-sine signals applied to architectural acoustics: an in-depth analysis of the two methods and some case studies of measurements inside theaters. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 78, p. 1611–1616, 2015. Citado na página 77.
- ISO, B. 3382-1: 2009,“. *Acoustics-Measurement of room acoustic parameters, Performance spaces*, 2009. Citado na página 75.
- JARAMILLO, A. M.; STEEL, C. *Architectural Acoustics*. [S.l.]: Routledge, 2014. Citado na página 35.
- JARUSZEWSKA, K. et al. Arac-multibook of architectural acoustics. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 78, p. 8–12, 2015. Citado 7 vezes nas páginas 15, 35, 36, 38, 47, 48 e 51.
- KINSLER, L. E. et al. Fundamentals of acoustics. *Fundamentals of Acoustics, 4th Edition, by Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders, pp. 560. ISBN 0-471-84789-5. Wiley-VCH, December 1999.*, p. 560, 1999. Citado 7 vezes nas páginas 15, 29, 30, 37, 49, 57 e 59.

- KUTTRUFF, H. *Room acoustics*. [S.l.]: Crc Press, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 76.
- LAMOTHE, M. R.; BRADLEY, J. Acoustical characteristics of guns as impulse sources. *Canadian Acoustics*, v. 13, n. 2, p. 16–24, 1985. Citado na página 75.
- LONG, M. *Architectural acoustics*. [S.l.]: Elsevier, 2005. Citado 19 vezes nas páginas 15, 16, 39, 40, 44, 45, 46, 47, 48, 50, 55, 56, 57, 58, 62, 63, 64, 65 e 66.
- MAGALHÃES, M. d. C. *Fundamentos de Acústica Estrutural*. [S.l.]: All Print Editora, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 55.
- MENG, Q. et al. Impulse response measurement with sine sweeps and amplitude modulation schemes. In: *IEEE. 2008 2nd International Conference on Signal Processing and Communication Systems*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–5. Citado na página 77.
- PÄTYNEN, J.; KATZ, B. F.; LOKKI, T. Investigations on the balloon as an impulse source. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 129, n. 1, p. EL27–EL33, 2011. Citado na página 75.
- PEREIRA, F. et al. *Comunicações Audiovisuais: Tecnologias, Normas e Aplicações*. [S.l.]: Lisboa, Portugal: IST Press, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 15, 29 e 30.

Anexos

ANEXO A – Código utilizado nas medições

```
% Código base para Medição de Parâmetros Acústicos
clc
clear all

MS = ita_measurement;

pause(2);

RIR = MS.run
RIR.plot_time_dB

PAR = ita_roomacoustics(RIR, 'bandsPerOctave', 1)
PAR.EDT.bar
PAR.T20.bar
PAR.T30.bar
```