

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo -
PósARQ

Dissertação de Mestrado

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE
AUDITÓRIOS COM ÊNFASE NOS CRITÉRIOS DA
INTELIGIBILIDADE DA FALA**

Comportamento Ambiental do Espaço Urbano e das Edificações

Mestranda: Gabriella Kurtz Oliveira
Orientador: Erasmo Felipe Vergara Miranda

Florianópolis
2015

Gabriella Kurtz Oliveira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE
AUDITÓRIOS COM ÊNFASE NOS CRITÉRIOS DA
INTELIGIBILIDADE DA FALA**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara

Florianópolis
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Gabriella Kurtz

Avaliação do comportamento acústico de auditórios com
ênfase nos critérios da inteligibilidade da fala /
Gabriella Kurtz Oliveira ; orientador, Prof. Dr. Erasmo
Felipe Vergara - Florianópolis, SC, 2015.

200 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Acústica arquitetônica.
3. resposta impulsiva. 4. inteligibilidade da fala. I.
Vergara, Prof. Dr. Erasmo Felipe . II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Gabriella Kurtz Oliveira

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE
AUDITÓRIOS COM ÊNFASE NOS CRITÉRIOS DA
INTELEGIBILIDADE DA FALA**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Arquitetura e Urbanismo”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 17 de julho de 2015.

Prof. Dr. Fernando Barth

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo

Banca Examinadora:

Prof. Erasmo Felipe Vergara Miranda, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Barth, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Fernando Westphal, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Gustavo da S. Vieira de Melo, Dr.
UFPA

Dr. Eng. Vitor Litwinczik

Dedico este trabalho à minha família pelo apoio incondicional à realização dos meus sonhos e objetivos. Aos amigos que me acompanham desde anos anteriores e aos novos grandes amigos que fiz durante esta etapa, pela paciência, compreensão e apoio emocional, e ao meu orientador, Felipe Vergara, pela confiança e dedicação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Erasmo Felipe Vergara pela oportunidade concedida de poder desenvolver a pesquisa do mestrado na área que tanto gosto da acústica arquitetônica, por acreditar na minha capacidade de desenvolver esta pesquisa, pela paciência, dedicação, apoio e incentivo ao longo do mestrado.

A Deus, pela vida e oportunidades colocadas em meu caminho.

Agradeço também, e muito, as duas pessoas mais importantes da minha vida, que são meu alicerce e meus exemplos de vida, meus pais, César e Carmen. Por todo amor e confiança dedicados a mim, por compreenderem minha ausência em casa e por todo apoio, emocional, psicológico e financeiro em toda esta etapa de mudança de vida. E a todos os familiares que estiveram próximos me auxiliando em diversos momentos.

Aos professores, Fernando Ruttkay e Ayrton Bueno pelo apoio prestado dentro e fora do laboratório, respectivamente, desde meu ingresso na Universidade Federal de Santa Catarina até o presente momento. Ao professor Dr. Vitor Litwinczik pela oportunidade concedida de realização do estágio docência na disciplina que ministrava e pelo vasto conhecimento compartilhado.

Aos professores Fernando Barth, Fernando Westphal e Gustavo Melo por aceitarem participar da avaliação do meu trabalho de mestrado em sua etapa final.

Aos bolsistas David Melão e Lucas Augusto, à mestranda Pollyanna Lima, aos amigos Juan Martin Aponte e Camilo pela grande ajuda na etapa de medições acústicas nos auditórios. Ao Juan Martin e ao Camilo acrescento o agradecimento pelas ajudas prestadas ao longo de todo o período de desenvolvimento do trabalho, desde as disciplinas até as conversas e debates fora de sala de aula.

À minha “anfitriã” e agora amiga Raquel Sousa pelo acolhimento e ajuda prestada desde o primeiro momento que cheguei a Florianópolis, e pela parceria até hoje.

Aos meus colegas e amigos do LabCon, Rapha, Natália, Bianca, Alexandre, Rafa, Marcelo, Rupp, Silvana, Marina, Ingrid e principalmente, Letícia, Maira, Cíntia e Ana Paula por toda a ajuda, carinho, amizade, conselhos, e momentos dentro e fora da

bolha. Destes momentos agradeço a oportunidade de conhecer meu, hoje, parceiro, amigo e namorado Luiz Gabriel, ao qual também devo agradecimentos pela paciência, conversas, risada e descontrações, por entender minha ausência em determinadas situações, e entender também meu estresse e nervosismo, inevitáveis nesse período de conclusão.

Aos meus amigos de longa data, que mesmo longe, estão sempre dispostos a ouvir um desabafo por telefone ou ler através do *whatsapp*, dando apoio, conselhos e incentivo nos momentos de altos e baixos destes dois anos de mestrado.

À CAPES pelo apoio financeiro para a realização do trabalho.

E a todos que, de alguma forma contribuíram para a elaboração deste trabalho.

“Habilidade é o que você é capaz de fazer. Motivação determina o que você faz. Atitude determina a qualidade do que você faz.”

(Lou Holtz, [data desconhecida])

RESUMO

Uma comunicação falada adequada é de extrema importância para várias finalidades e em diferentes tipos de ambientes como, por exemplo, salas de aula, auditórios, aeroportos e ambientes de trabalho em geral, onde mensagens importantes ou de emergência devem ser transmitidas. No meio acadêmico, a inteligibilidade da palavra é o principal requisito exigido dentre as qualidades acústicas de um ambiente, em função tanto do desempenho intelectual dos ouvintes, quanto para a saúde destes e dos oradores. Essa boa qualidade do discurso depende das características acústicas do local e pode ser avaliada através do Índice de Transmissão da Fala (STI). No presente trabalho, oito auditórios selecionados entre os Centros de Ensino da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) foram caracterizados através de medições acústicas da resposta impulsiva, conforme recomendações da norma ISO 3382:2009. Assim, foram obtidas respostas dos parâmetros acústicos como o tempo de reverberação (TR), o tempo de decaimento inicial (EDT), a definição da fala (D_{50}), a clareza (C_{80}) e o STI, as quais foram comparadas com os cálculos analíticos dos dois principais parâmetros ligados à inteligibilidade da fala: o TR e o STI. Para o cálculo do STI, as medições do tempo de reverberação e do ruído de fundo permitiram a quantificação do fator de redução de modulação, sendo possível realizar uma análise do STI por bandas de frequências de oitava. Por fim, foi realizada uma simulação do comportamento dos auditórios, frente ao TR e ao STI, quando ocupados. De uma forma geral, os resultados de TR e EDT demonstraram ambientes muito reverberantes, com médias que variam entre 0,5 e 3,1 segundos, e 0,3 e 6,6 segundos, respectivamente, quando desocupados. A definição (D_{50}) variou na faixa de 2,6% a 88,7%, e a clareza (C_{80}), entre -13,5 e 13,3 dB com a maioria dos auditórios estando na sua faixa adequada de valores neste parâmetro. Quanto ao STI, de todos os ambientes avaliados, apenas um é considerado “bom”, três são “razoáveis” e quatro “pobres”, classificados de acordo com a norma ISO 3382. Quando confrontados com os valores na situação de máxima ocupação, há uma melhora considerável dos parâmetros. A comparação do método analítico com o experimental, e as curvas de redução de modulação permitem julgar positivamente os métodos utilizados como confiáveis e

possíveis ferramentas de projeto para uso dos profissionais da área, visto que os valores de desvios padrão não ultrapassam 0,02.

Palavras-chave: Acústica arquitetônica, resposta impulsiva, inteligibilidade da fala.

ABSTRACT

An adequate speech communication is extremely important for many purposes and in different types of environments, for example, classrooms, auditoriums, airports and general working environment where important or emergency messages should be transmitted. In academic field the speech intelligibility is the main requirement demanded from the acoustic qualities of an environment, in function of intellectual performance of listeners for their health and speakers. This good quality of speech depends of acoustic characteristics of the place and it can be evaluated through of Speech Transmission Index (STI). In the present work eight auditoriums were selected between Studies Center of Federal University of Santa Catarina (UFSC) were characterized by acoustic impulse response measurements, according to recommended by the standard ISO 3382:2009. Thus acoustic parameters responses were obtained such as reverberation time (RT), the early decay time (EDT), the definition of speech (D_{50}), clarity (C_{80}) and the STI, and were compared to analytical calculations two main parameters related to speech intelligibility: the RT and the STI. For the calculation of the speech transmission index (STI), the measurements about reverberation time and background noise allowed quantification of the modulation reduction factor it being possible to perform an analysis by the STI octave bands of frequencies. Finally it carried out a simulation of the behavior of auditoriums across the RT and STI when occupied. In general the results of RT and EDT demonstrated very reverberant environments with average ranging between 0.5 and 3.1 seconds, and 0.3 and 6.6 seconds respectively when unoccupied. The definition (D_{50}) varied in the range of 2.6% to 88.7%, and the clarity (C_{80}) between -13.5 and 13.3 dB with the most auditoriums in their adequate range of values of this parameter. About the STI, all environments evaluated only one is considered "good", three are "reasonable" and four "poor", classified according to the standard ISO 3382. When faced with the values in the situation of maximum occupancy there are improvement considerable parameters. The comparison of the analytical method with the experimental, and the modulation reduction curves, allows positively judge the methods used as reliable and possible design tools for use by

professional in the field of acoustic, evidenced by the standard deviations values that do not exceed 0.02.

Keywords: Architectural acoustic, impulse response, speech intelligibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Visão geral de conceitos relacionados à acústica de salas.	36
Figura 2 - Espectro da fala masculina e feminina.....	38
Figura 3 - Faixas de frequência da audição nos seres vivos. ...	40
Figura 4 - Diagrama que ilustra a geração da resposta impulso.42	
Figura 5 - Resposta da sala em estado estacionário.	43
Figura 6 - Característica da direcionalidade de sons da fala para duas bandas de frequência diferentes. (a) plano horizontal e (b) plano vertical.	45
Figura 7 - Efeito do tempo de reverberação na palavra back. ..	46
Figura 8 - Resposta impulsiva em um ambiente nos 400 ms iniciais.....	48
Figura 9 - Definição do tempo de reverberação.	49
Figura 10 - Tempo de reverberação ótimo para 500 Hz.....	52
Figura 11 - Valor percentual para conversão dos tempos de reverberação.	53
Figura 12 - Comportamento do STI com a relação sinal-ruído e com o TR.	59
Figura 13 - Curvas de STI em relação ao tempo de reverberação e relação sinal-ruído.....	60
Figura 14 - Comparação do índice de articulação (AI) com índice de transmissão da fala (STI).	63
Figura 15 - Correlação de AI para um espaço reverberante.	64
Figura 16 - Quadro resumo dos parâmetros acústicos	66
Figura 17 - Esquema com etapas da metodologia	67
Figura 18 - Planta baixa e corte do auditório do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC.	69
Figura 19 - (a) Vista da entrada do auditório (b) Vista do fundo do auditório.....	70
Figura 20 - Etapas dos procedimentos experimentais do Estudo Piloto.....	71
Figura 21 - Conexão dos equipamentos da segunda fase do estudo piloto.	72

Figura 22 - Conexão dos equipamentos adicionados na terceira etapa do estudo piloto.....	73
Figura 23 - Equipamentos utilizados na quarta etapa do estudo piloto.....	74
Figura 24 - Gráfico representando resultados da primeira etapa do estudo piloto.....	76
Figura 25 - Gráfico com resultados da segunda etapa do estudo piloto:.....	78
Figura 26 - Gráfico com resultados da terceira etapa do estudo piloto.....	79
Figura 27 - Gráfico com resultados da quinta etapa do estudo piloto: Comparativo entre os tempos de reverberação.....	80
Figura 28 - (a) Vista da audiência. (b) Vista do palco do auditório.....	83
Figura 29 - Planta Baixa e corte do auditório do CCE.....	84
Figura 30 - (a) Vista da área da audiência. (b) Vista do palco do auditório.....	85
Figura 31 - Planta Baixa e corte do auditório do CCS.....	86
Figura 32 - Planta Baixa e corte do auditório do CCJ.....	88
Figura 33 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da área de audiência.....	89
Figura 34 - Planta Baixa e corte do auditório do CDS.....	91
Figura 35 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da audiência do auditório.....	92
Figura 36 - (a) Vista da audiência. (b) Vista do palco do auditório.....	93
Figura 37 - Planta Baixa e corte do auditório do CED.....	94
Figura 38 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da audiência.....	95
Figura 39 - Planta Baixa e corte do auditório do CSE.....	96
Figura 40 - Planta Baixa e corte do auditório do CTC – Eng. Produção.....	99
Figura 41 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da área de audiência.....	100
Figura 42 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da área de audiência do auditório.....	102

Figura 43 - Planta Baixa e corte do auditório do CTC – Eng. Elétrica.....	103
Figura 44 – Planta baixa com os pontos de medições do auditório do CCE.	109
Figura 45 - Esquema do método de cálculo analítico do STI..	111
Figura 46 - Valores dos tempos de reverberação (TR) por pontos de receptores, por bandas de frequências.	116
Figura 47 - Comparativo entre os valores médios de TR e EDT em função das bandas de frequências	122
Figura 48 - Valores de definição (D_{50}) para todas as posições de receptores em função das bandas de frequências de oitava. .	128
Figura 49 - Valores de clareza (C_{80}) para todas as posições de receptores em função das bandas de frequência de oitava....	135
Figura 50 - Comparação entre TR experimental e TR analítico de Eyring sem pessoas.	145
Figura 51 - Comparativo do TR de Eyring com e sem ocupação em função das bandas de frequência de oitava.	149
Figura 52 - Comparativo entre STI experimental e analítico com e sem pessoas.	156
Figura 53 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CCE.	160
Figura 54 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CCS.	162
Figura 55 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CCJ.	163
Figura 56 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CDS.	165
Figura 57 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CED.	166
Figura 58 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CSE.....	168
Figura 59 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CTC-EP.	169
Figura 60 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CTC-EE.	170

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contribuição do nível da voz em cada banda de frequência de oitava e sua contribuição para a inteligibilidade da palavra	38
Tabela 2 - Valores em dB da voz masculina e feminina de acordo com o esforço realizado.	39
Tabela 3 - Fatores de ponderação específicos para homens e mulheres em bandas de oitava.	62
Tabela 4 - Classificação do STI quanto à avaliação subjetiva ..	62
Tabela 5 - Quadro de áreas dos materiais e respectivos coeficientes de absorção sonora.	70
Tabela 6 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	82
Tabela 7 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	87
Tabela 8 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	88
Tabela 9 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	90
Tabela 10 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	94
Tabela 11 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	97
Tabela 12 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	100
Tabela 13 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.....	101
Tabela 14 – Quadro comparativo das características dos auditórios selecionados.....	105
Tabela 15 - Situação ambiental dos dias de ensaios experimentais.	114
Tabela 16 - Valores médios e desvios padrão do TR de todos os auditórios por bandas de frequência de oitava, medidos sem ocupação.	121
Tabela 17 - Valores médios de EDT e valores da diferença entre EDT e TR para análise por bandas de frequência de oitava para todos os auditórios.	127

Tabela 18 - Valores médios e desvios padrão de D_{50} por bandas de frequência de oitava para todos os auditórios.....	133
Tabela 19 - Valores médios e desvios padrão de C80 para todos os auditórios e bandas de frequências de oitava.	140
Tabela 20 - Valores de STI por posições de receptores, média e desvios padrão e classificação subjetiva dos auditórios.	142
Tabela 21 - Resultados médios (500 Hz e 1.000 Hz) dos parâmetros acústicos analisados nos auditórios.....	144
Tabela 22 - Valores médios de TR analítico com e sem pessoas para todos os auditórios e bandas de frequência de oitava.	155
Tabela 23 - Valores comparativos entre STI experimental e analítico.....	157
Tabela 24 - STI analítico com ponderação para masculino e feminino.....	171

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%ALCons	Porcentagem de Perda de Articulação de Consoantes
m	Absorção do ar
A	Absorção total da sala
S_i	Área do material
S_T	Área total da sala
B&K	Brüel & Kjaer
CED	Centro de Ciências da Educação
CCS	Centro de Ciências da Saúde
CCJ	Centro de Ciências Jurídicas
CCE	Centro de Comunicação e Expressão
CDS	Centro de Desportos
CSE	Centro Socioeconômico
CTC-EP	Centro Tecnológico – Engenharia de Produção
CTC-EE	Centro Tecnológico – Engenharia Elétrica
C_{80}	Clareza
α_i	Coefficiente de absorção sonora de um determinado material
$\bar{\alpha}$	Coefficiente de absorção sonora médio da sala
NC	Curvas de avaliação de ruído (<i>Noise Criteria</i>)
dB	Decibel
D_{50}	Definição
$se(SI)$	Erro Padrão de Inteligibilidade da Fala
$m(F_m)$	Fator de redução da modulação
F_m	Frequência de modulação
f_s	Frequência de Schroeder
MTF	Função de Transferência de Modulação
AI	Índice de articulação
STI	Índice de transmissão da fala
SI	Inteligibilidade da fala
LabCon	Laboratório de Conforto Ambiental

LVA	Laboratório de Vibrações e Acústica
$\overline{L_{SNapp}}$	Média da relação sinal-ruído aparente
L_{eq}	Nível de Pressão Sonora Contínua Equivalente
L_{SNapp}	Nível sinal-ruído aparente
S/N	Relação sinal-ruído
RIR	Resposta Impulsiva do Recinto
EDT	Tempo de Decaimento Inicial
TR	Tempo de Reverberação
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
V	Volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	29
1.1 JUSTIFICATIVA	30
1.2 OBJETIVOS.....	33
1.2.1 Objetivo geral	33
1.2.2 Objetivos específicos	33
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO	34
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1 ACÚSTICA ARQUITETÔNICA.....	35
2.2 COMPORTAMENTO SONORO EM AMBIENTES FECHADOS.....	41
2.2.1 Som direto, primeiras reflexões e reverberação	41
2.2.2 Ruído de fundo	44
2.2.3 Palavra Falada	45
2.3 PARÂMETROS ACÚSTICOS PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL	47
2.3.1 Resposta Impulsiva	47
2.3.2 Tempo de Reverberação	48
2.3.3 Tempo de decaimento inicial (EDT)	53
2.3.4 Inteligibilidade da fala (SI)	54
2.3.5 Índice de transmissão da fala (STI)	56
2.3.6 Índice de articulação da fala (<i>Articulation Index</i>)	62
2.3.7 Definição (D_{50})	64
2.3.8 Clareza (C_{80})	65
3 METODOLOGIA	67
3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS – O “ESTUDO PILOTO”	67
3.1.1 Levantamento arquitetônico do ambiente	68
3.1.2 Descrição dos procedimentos	71
3.1.3 Análise dos resultados e discussões das etapas do estudo piloto	75
3.2 CRITÉRIO DE SELEÇÃO DOS AUDITÓRIOS	80
3.3 DESCRIÇÃO DOS AMBIENTES DE ESTUDO.....	82

3.3.1 Auditório do Centro de Comunicação e Expressão – CCE	82
3.3.2 Auditório do Centro de Ciências da Saúde – CCS	84
3.3.3 Auditório do Centro de Ciências Jurídicas – CCJ	87
3.3.4 Auditório do Centro de Desportos – CDS	89
3.3.5 Auditório do Centro de Ciências da Educação – CED .	92
3.3.6 Auditório do Centro Socioeconômico – CSE	95
3.3.7 Auditório do Centro Tecnológico – CTC – Engenharia de Produção	97
3.3.8 Auditório do Centro Tecnológico – CTC – Engenharia Elétrica	100
3.4 MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA	107
3.4.1 Método experimental	107
3.4.1.1 Equipamentos e sistema de medições	107
3.4.1.2 Posicionamento dos equipamentos e configurações das medições	108
3.4.2 Método analítico	110
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	113
4.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE	113
4.1.1 Tempo de Reverberação (TR)	115
4.1.2 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)	121
4.1.3 Definição (D₅₀)	128
4.1.4 Clareza (C₈₀)	134
4.1.5 Índice de Transmissão da Fala (STI)	141
4.1.6 Discussão e conclusão do método experimental	143
4.2 RESULTADOS TEÓRICOS	144
4.2.1 Tempo de Reverberação analítico	148
4.2.2 Índice de Transmissão da Fala (STI)	156
4.2.3 Discussões	171
5 CONCLUSÕES	173
5.1 CONCLUSÕES SOBRE A METODOLOGIA	173
5.2 CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS RESULTADOS.....	174
5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	177

5.3.1 Limitações do trabalho.....	177
5.3.2 Sugestões para trabalhos futuros.....	177
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	179
APÊNDICE	204
APÊNDICE A – PLANTA BAIXA DOS AUDITÓRIOS COM PONTOS DE FONTE E RECEPTORES.	204
APÊNDICE B – VALORES DE TR EXPERIMENTAL POR PONTOS DE MEDIÇÕES.	209
APÊNDICE C – VALORES DE EDT POR PONTOS DE MEDIÇÕES PARA OS AUDITÓRIOS.	212
APÊNDICE D – VALORES DE DEFINIÇÃO (D_{50}) POR PONTOS DE MEDIÇÕES PARA OS AUDITÓRIOS.	215
APÊNDICE E – VALORES DE C_{80} PARA OS PONTOS DE MEDIÇÃO PARA OS AUDITÓRIOS.....	217

1 INTRODUÇÃO

Muito tem se falado em barulho das cidades, poluição sonora, desempenho acústico de edificações, máquinas e equipamentos, e condições mínimas para a exposição do ser humano a estes “sons” indesejáveis. Ainda assim, sabendo a influência destes sobre a saúde dos usuários, esses “sons” são muitas vezes negligenciados por autoridades e profissionais responsáveis por cada área. Diversos meios de comunicação, como jornais, revistas e programas de televisão têm divulgado em suas matérias discussões e enfoques sobre os transtornos ocorridos sempre que as pessoas convivem com os ruídos no seu cotidiano. Tais problemas e discussões acarretaram inclusive o desenvolvimento de normas técnicas, a fim de tornar obrigatório o cuidado com este fenômeno e, assim, garantir uma melhor qualidade de vida à população.

Outra situação e preocupação que vem gerando discussões além dos ruídos causados pelas cidades e seus usuários é o desempenho interno de um ambiente, principalmente no âmbito escolar. Esses são locais em que o indivíduo deve estar concentrado na tarefa de ouvir, reter e aprender sobre um determinado assunto, apesar de qualquer ruído que possa estar atuando no momento. Em termos acústicos, trata-se da inteligibilidade da fala, ou seja, do quão bem a fala do orador é recebida pelo ouvinte. O não cumprimento dessa condição acústica mínima, além dos problemas de saúde já comprovados, ocasiona também problemas de nível intelectual e de desempenho de aprendizagem escolar e profissional.

Estudos realizados, como por exemplo, por Dreossi e Momensohn-Santos (2005), Klatte, Lachmann e Meis (2010) e Moraes *et al.* (2014) retratam as consequências negativas do ruído no processo de ensino, tais como: dificuldade de concentração, cansaço, perda de parte do conteúdo ensinado e inteligibilidade da fala. O fato dos ambientes de ensino apresentarem, em sua maioria, condições acústicas desfavoráveis não significa que apenas os alunos são prejudicados, mas também os professores. Os professores estão submetidos às questões de saúde, principalmente aos problemas relacionados com a voz.

Segundo Losso (2003), quando uma sala apresenta demasiado tempo de reverberação ou um ruído de fundo alto, o professor tem a necessidade de aumentar o seu tom de voz, precisando emitir inconscientemente um nível de pressão sonora superior a 15 dB em relação ao nível de pressão sonora do ruído de fundo. Em espaços destinados a palestras, reuniões e eventos, como auditórios, salas de conferências ou salas de aula, não é diferente. Nesses tipos de salas, de acordo com Elkhateeb (2012), a inteligibilidade da palavra é o principal requisito e a boa qualidade do discurso depende das características acústicas do ambiente. Baseando-se nessas características a respeito da inteligibilidade da fala e também pela pouca quantidade de estudos realizados nessa área no Brasil, esta pesquisa propõe a realização de um estudo de casos, com ênfase a esse critério acústico relacionado ao discurso e sua inteligibilidade que, como já citado, é um fator de grande importância para todos os envolvidos dentro do ambiente.

A partir disso, foram realizadas medições acústicas em auditórios da Universidade Federal de Santa Catarina, a fim de conferir a qualidade acústica de inteligibilidade da fala dos principais auditórios do *campus* central David Ferreira Lima, de educação e ensino, onde transmitir importantes informações é a principal atividade realizada neste órgão público. Busca-se por meio desta pesquisa também agregar informações a respeito dos métodos de cálculos de determinados parâmetros acústicos vinculados à inteligibilidade da fala, de modo a validar seus resultados e garantir que profissionais da área possam trabalhar neste tema tão relevante para os usuários, mesmo para àqueles que não têm acesso a equipamentos ou softwares sofisticados.

1.1 JUSTIFICATIVA

O som é uma modalidade de comunicação e de transmissão de informações entre o homem e demais seres. Esta comunicação pode ocorrer em locais abertos ou fechados e variar de acordo com as condições da fonte, do receptor e do caminho percorrido pela onda sonora. Em um ambiente fechado, o modo como esta comunicação acontece justifica a necessidade de se ter uma adequada propagação sonora e um controle do ruído. Segundo Bistafa (2011), o ruído permeia as atividades humanas 24 horas por dia e vem sendo apontado como uma das

principais causas de deterioração da qualidade de vida, principalmente nas grandes cidades. Moraes *et al.* (2014) afirmam que o ruído pode prejudicar a saúde do ser humano de forma irreversível, além de impactar negativamente no comportamento, cognição, metabolismo e audição, causar perturbações no sono, na concentração, no trabalho mental, desenvolver irritação, ansiedade, tonturas, gastrite, hipertensão e náuseas.

Em ambientes escolares e de ensino superior, onde a comunicação verbal é a principal forma de transmissão da informação, isso se torna ainda mais grave. Isso é comprovado por meio de estudos realizados em vários países, que demonstram que o aprendizado nas escolas fica comprometido por atividades ruidosas intra e extramuros. Essa ineficiência acústica dos ambientes pode causar modificação da fala do orador, que desencadeia problemas no processo de aprendizagem. Segundo Knudsen e Harris (1950), as escolas têm como função a promoção da aprendizagem, a qual é majoritariamente conseguida através da comunicação oral e da audição. Desta forma, a acústica desses espaços é uma das propriedades físicas fundamentais que determina o sucesso do edifício no desempenho da função primordial. Assim, a eliminação de ruído e a redução da reverberação são pontos indispensáveis na adaptação das salas de aula para a sua função de instrução oral.

Vê-se então a necessidade de dedicar atenção à qualidade, ao desempenho e ao conforto acústico das salas de ensino. Mesmo que o conforto acústico esteja diretamente relacionado com questões subjetivas, que por sua vez também estão fortemente ligadas às questões internas e externas do ambiente, como seu isolamento e condicionamento acústico.

Segundo Soler (2004), projetos de auditórios de uso múltiplo têm se tornando cada vez mais presentes nos programas de necessidades arquitetônicos, tanto de empresas, quanto institucionais. Os espaços usados para palestras, aulas, treinamentos e apresentações são elementos de destaque neste tipo de empreendimento. Assim, o auditório deve, necessariamente, atender a questões técnicas, propiciar conforto ambiental ao usuário e apresentar qualidade estética. Para isso, a acústica deve ser pensada e planejada desde a concepção

inicial do projeto de um auditório, de modo similar como a questão estrutural é realizada.

No Brasil, existem muitos estudos que tratam do desempenho acústico de modo geral desses ambientes. Outros estudos abordam os tempos de reverberação e a acústica vinculada à música; porém somente alguns tratam especificamente ou com ênfase a questão da fala, que é essencial para as atividades desempenhadas nos auditórios. Tal fato evidencia no país a necessidade de estudos que tratem, com foco direto e aprofundado, este parâmetro de caracterização da acústica de salas.

Decorrente da relevância da acústica na vida dos usuários brasileiros teve-se a criação recente da norma técnica NBR 15.575 – Edificações habitacionais - Desempenho, que entrou em vigor no ano de 2013. No entanto normas mais antigas também devem ser citadas, como é o caso das NBR 10151 e 10152, relacionadas aos ruídos externos e internos à edificação, respectivamente, de acordo com seu uso e localização. Atualmente essas normas estão em revisão para melhor tratar assuntos como conforto e desempenho acústicos de um local.

Partindo para aspectos mais práticos, agrupando essas normas acústicas junto ao trabalho em equipe dos profissionais da área, poderão ser previstos comportamentos do ambiente e do entorno. Assim projetos acústicos podem ser elaborados de modo satisfatório, evitando trabalhos de correções, que além de possuir um custo alto ainda é limitado pelo já existente. No caso de ambientes relacionados ao uso da palavra falada, como é o caso de auditórios, o aprendizado e o entendimento são prejudicados em função das condições físicas, de revestimento interno e do ruído dentro e fora da sala. Esses devem ser projetados de modo a aproveitar ao máximo as questões de inteligibilidade do discurso e todas as outras variáveis que estão diretamente ligadas à ela, como reverberação, definição, clareza e tempo de decaimento inicial. Todos esses parâmetros são conceituados e descritos no decorrer deste trabalho.

A partir das corretas decisões projetuais, há uma redução no uso de materiais absorventes e/ou refletivos, reduzindo também os custos da obra. O posicionamento desses materiais, bem como suas especificações, pode contribuir de modo crucial para o bom desempenho e aproveitamentos das atividades desenvolvidas no espaço, para o conforto ambiental e para a

saúde dos ocupantes. No entanto, tais critérios não são atualmente colocados em prática como itens norteadores para os projetos e como itens importantes para funcionamento do espaço, o que leva a utilização do ambiente mesmo em condições muitas vezes inadequadas.

1.2 OBJETIVOS **Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento acústico de oito auditórios do Campus Central da Universidade Federal de Santa Catarina, onde a principal atividade realizada é a transmissão de informações através da palavra falada, com ênfase nos critérios de inteligibilidade da fala determinados a partir de parâmetros acústicos relacionados com critérios de qualidade, de energia e inteligibilidade.

1.2.2 **Objetivos específicos**

- Investigar experimentalmente o comportamento do som e as condições acústicas atuais de alguns auditórios da Universidade, considerando critérios de caracterização de salas como TR, EDT, D_{50} e STI em diferentes condições de ocupação;
- Analisar, a partir das características físicas e arquitetônicas de cada auditório, a influência da geometria e características do espaço físico nos resultados de parâmetros acústicos obtidos experimentalmente;
- Realizar uma análise da inteligibilidade da fala, através do parâmetro acústico de Índice de Transmissão da Fala (STI) e realizar análise comparativa deste com o seu método de cálculo analítico;
- Investigar a possibilidade de realizar a análise do STI por bandas de frequência através do método de cálculo;
- Avaliar o possível comportamento dos auditórios estudados frente aos parâmetros como TR, EDT, D_{50} e STI, caso estivessem com lotação máxima de ocupação.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho é estruturado em cinco capítulos. O **primeiro** corresponde à introdução, onde foi apresentado o panorama geral do trabalho, com uma breve descrição da realidade acústica dos ambientes e suas consequências para os usuários, a justificativa do estudo proposto e os objetivos.

O **segundo capítulo** apresenta a fundamentação teórica, ou seja, a revisão bibliográfica dos conceitos relevantes e dos parâmetros acústicos que serão utilizados no desenvolvimento da pesquisa na área da acústica de auditórios, incluindo seus conceitos, definições e algumas equações. Itens que serviram de embasamento para a realização do estudo.

O **terceiro capítulo** refere-se à metodologia adotada para a realização das medições acústicas nos estudos de caso e para a realização dos cálculos analíticos. Nesta parte, é retratado o estudo piloto que auxiliou na definição do procedimento metodológico e os passos a serem seguidos posteriormente no método experimental através da resposta impulsiva acústica.

O **quarto capítulo** corresponde aos resultados de cada etapa, obtidos pelo método experimental e analítico. São analisados os parâmetros acústicos separadamente com o desempenho dos oito auditórios estudados, e após isso, são apresentados os resultados de cálculos de tempos de reverberação e inteligibilidade da fala, correlacionando os dois métodos a fim de validar a utilização dos cálculos para caracterização de ambientes. Também foi simulado analiticamente o comportamento de cada auditório, quando ocupado.

Por fim, na **quinta seção** do trabalho são realizadas as considerações finais obtidas com o estudo desenvolvido. Nela são destacadas as principais contribuições do trabalho, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ACÚSTICA ARQUITETÔNICA

Originada na Antiguidade com os teatros gregos e romanos ao ar livre, a acústica arquitetônica começou a evoluir desde então. Essas “arenas de show” começaram a ser construídas dentro de limites físicos com paredes e telhados, resultando nos chamados auditórios e anfiteatros. Desta evolução, a acústica começa a ser incorporada também nas salas de aulas, templos, igrejas, estúdios, cinemas, estando presente até hoje em outros tipos de produção arquitetônica.

Na arquitetura, sabe-se a importância do agrupamento tanto das áreas técnicas, sejam elas estruturais e instalações, como das áreas vinculadas ao entorno, urbanismo, paisagismo, e conforto ambiental para uma realização com sucesso do trabalho do arquiteto. Dando ênfase apenas para a área de conforto ambiental, que engloba conforto térmico, acústico e visual (lumínico), e limitando ainda mais o estudo para a área apenas da acústica arquitetônica. Ressalta-se que esta pode ser subdividida em três áreas: o isolamento acústico, o condicionamento acústico, e a acústica urbanística. O isolamento acústico trata da proteção de um determinado recinto contra interferências externas (ruídos aéreos e vibrações), adaptando o local ao uso para qual foi destinado. O condicionamento acústico é responsável por melhorar a qualidade tanto de geração do som quanto da percepção deste dentro de um ambiente, também com preocupações vinculadas ao seu uso. Por fim a acústica urbanística está relacionada à geração de ruídos externos em diferentes zonas urbanas, que pode ser controlada ou limitada por meio das leis ou normas técnicas.

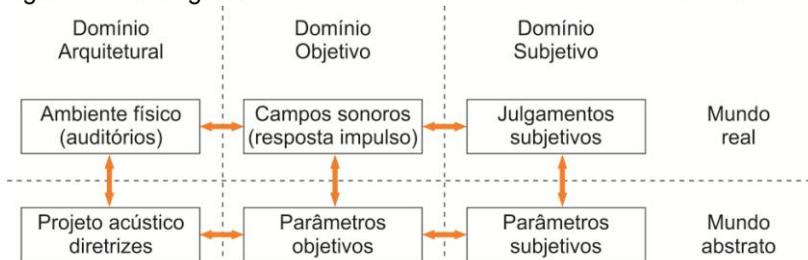
É de interesse e foco principal deste trabalho, o condicionamento acústico, que de uma forma mais específica tem sua qualidade definida por diversos parâmetros de acordo com o tipo de mensagem sonora emitida dentro do ambiente. Isso ocorre devido à percepção humana ser diferente para a fala e para a música. Nessa última, há também identificações sonoras distintas para cada tipo de instrumento e som que é tocado.

Em diferentes ambientes, a acústica arquitetônica fica clara quando tratamos esses locais como uma rede de comunicação

composta basicamente de emissor, canal ou meio de transmissão (no caso, o próprio ambiente) e o receptor (LLINARES; LLOPIS; SANCHO, 1996). Já a boa qualidade acústica só irá acontecer quando este canal de transmissão conseguir levar a mensagem sonora até o receptor sem grandes alterações das características originais da onda sonora, e isso só é possível quando não há excesso de absorção da energia incidida ou de reflexões no ambiente. Sinteticamente, é possível dizer que o critério básico para qualificar a percepção das mensagens orais é que o som seja inteligível, ou seja, que tenha intensidade suficiente para superar o ruído de fundo e que, como já dito anteriormente, o espectro sonoro seja minimamente alterado para o som ser reconhecido.

A Figura 1, adaptada de Gade (2007), ilustra o universo da acústica na arquitetura. Na parte de cima tem-se o que acontece no mundo real. Indo da esquerda para a direita, tratando de auditórios, tem-se os campos sonoros objetivos, que por sua vez causam impressões (julgamentos) subjetivas das condições acústicas. Nesses três tópicos há uma grande liberdade de variação, visto que “salas podem diferir em vários pontos (de dimensões gerais até pequenos detalhes como a maçaneta da porta)” e, além disso, cada indivíduo é capaz de expressar sentimentos diferentes para um mesmo ambiente acústico.

Figura 1 - Visão geral de conceitos relacionados à acústica de salas.



Fonte:(GADE, 2007), adaptado pela autora.

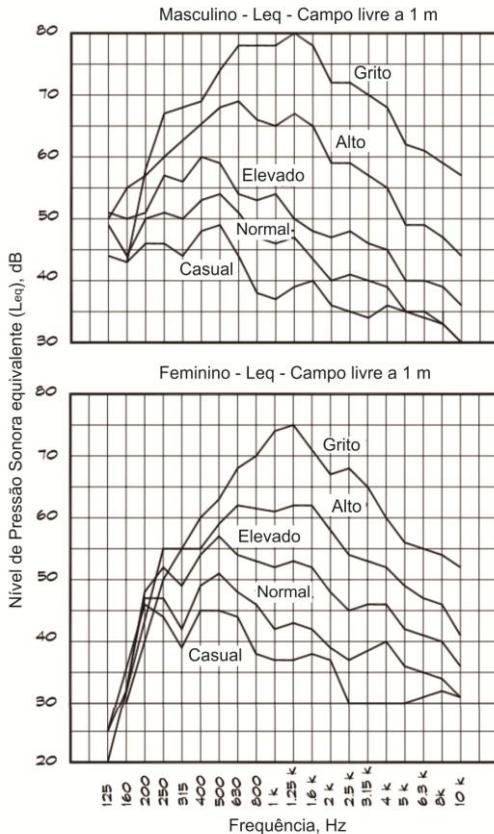
Para simplificar e traduzir essa complexa relação entre características reais e subjetivas de um determinado local, estudos de 1960 e 1970 revelaram os parâmetros objetivos (vinculados ao campo sonoro e representados abaixo da linha que separa horizontalmente a figura), e somente a partir das décadas de 1980 e 1990 estes começaram a ser analisados com

relação às variáveis de projetos (caixa “projeto acústico – diretrizes”). Esta linha, do “mundo abstrato”, deixa evidente a influência dos parâmetros arquitetônicos que abrangem fatores, tais como: o traçado da planta do auditório (determinação da forma), do corte do ambiente (traçado das linhas da visão), criação de mezaninos, escolha da estrutura da parede, altura da sala e forma do teto.

No caso de ambientes como auditórios, em que sua principal finalidade é a de transmitir informações importantes para um determinado número de pessoas, Knudsen e Harris (1950), Long (2006) e Barron (2010) dizem que o primeiro objetivo para esses locais é conferir ao ambiente condições para se ter uma boa inteligibilidade da fala. Essa característica significa o quão bem a fala é reconhecida e entendida.

Para que isso seja possível devem-se levar em conta alguns fatores, tais como: o tempo de reverberação ótimo, a eliminação de defeitos acústicos, como ecos e ecos flutuantes, a maximização da audibilidade na área de audiência, a minimização do nível de ruído de fundo da sala e quando necessário, o fornecimento de um sistema de reforço da fala. Vale ressaltar que todos esses fatores são necessários, principalmente quando se trata da palavra falada como fonte sonora, visto que esta possui uma energia acústica pequena. Por exemplo, o nível de pressão sonora médio da fala masculina em um intervalo de tempo é de 64 dB a uma distância de 1 m, diretamente na frente do emissor, enquanto que a voz natural das mulheres, nas mesmas circunstâncias, é em torno de 61 dB (KNUDSEN, 1950). Já Long (2006) apresenta, Figura 2, os níveis de pressão sonora equivalente (L_{eq}), por bandas de frequência de terço de oitava, gerados pela fala masculina e feminina, considerando um ruído de fundo compatível com um ambiente silencioso no turno da noite. A Tabela 1, adaptada de Isbert (1998), exhibe a contribuição do esforço da voz, por bandas de frequência de oitava, e a contribuição dessas frequências para a inteligibilidade da palavra.

Figura 2 - Espectro da fala masculina e feminina.



Fonte: (LONG, 2006), modificado pela autora.

Tabela 1 - Contribuição do nível da voz em cada banda de frequência de oitava e sua contribuição para a inteligibilidade da palavra

Contribuição do esforço da voz						
7%	22%	46%	20%	3%	2%	-
↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓
-	5%	13%	20%	31%	26%	5%
Contribuição para a inteligibilidade da palavra						

Fonte: (ISBERT, 1998), modificado pela autora.

A principal diferença entre o espectro sonoro masculino e feminino pode ser observado nas frequências abaixo de 200 Hz. No espectro masculino é visível uma maior concentração de energia vocal nas bandas de terço de oitava abaixo de 200 Hz. Em média para uma distância de 1 m da medição, os valores da fala, segundo Silva (2013), variam em dB entre os sexos e de acordo com os esforços da voz, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores em dB da voz masculina e feminina de acordo com o esforço realizado.

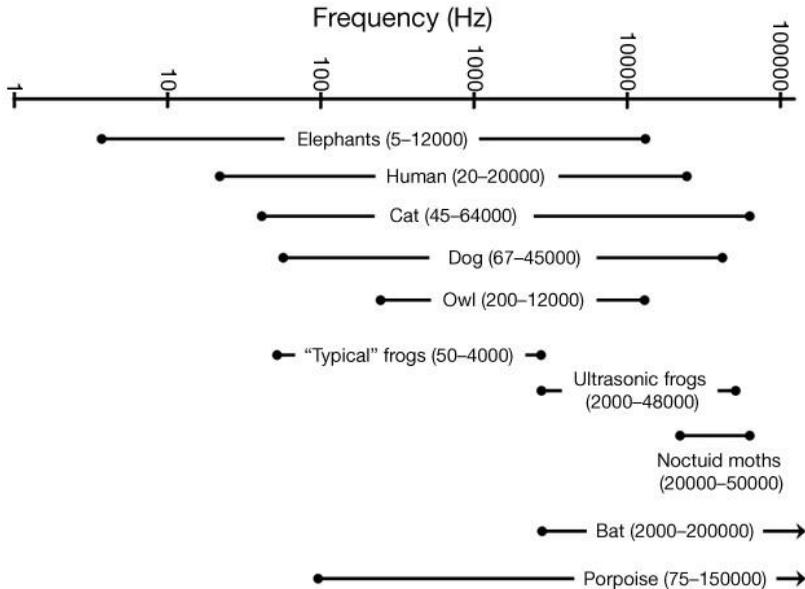
Orador	Esforço da voz			
	Normal	Elevado	Alto	Grito
Masculino	58	64	70	76
Feminino	53	59	65	71

Fonte: (SILVA, 2013), modificado pela autora.

De acordo com Mehta, Johnson e Rocafort (1999), a potência acústica instantânea da voz de um orador varia consideravelmente com o tempo. No caso de 5 minutos ou mais, a potência acústica total da fala encontra-se 95% da faixa abaixo de 1000 Hz. No entanto, apenas 30% dessa região contribuem para a inteligibilidade da fala. Além disso, cerca de 60% da potência sonora está acima dos 500 Hz e a contribuição para a inteligibilidade da fala é de apenas 10%. Quanto à direcionalidade, Bistafa (2011) afirma que a voz humana é marcante nesse quesito principalmente acima dos 500 Hz.

Em relação aos aspectos vinculados às frequências da audição, em seres humanos jovens e com audição normal, a capacidade de ouvir sons está na faixa de frequências que varia entre 20 Hz e 20.000 Hz. Ao longo do tempo, essa capacidade vai diminuindo, reduzindo essa faixa principalmente nas altas frequências, a partir de 2.000 Hz (BISTAFA, 2011; SILVA, 2013). A Figura 3 apresenta a faixa de frequência compatível para os seres humanos e também para os demais seres vivos.

Figura 3 - Faixas de frequência da audição nos seres vivos.



Fonte: (BURNETT, 2011).

A maioria dos discursos é formada por vogais que pertencem a faixa das baixas frequências e segundo Silva (2013), a inteligibilidade da palavra tem grande relevância nas altas frequências, ou seja, nas consoantes. Nesse caso, sendo as consoantes emitidas num curto espaço de tempo e com menores níveis de pressão sonora em relação às vogais, essas são vulneráveis a mascaramento pelas vogais, o que torna o tempo de reverberação a principal característica acústica capaz de prejudicar a inteligibilidade da palavra. Este efeito de mascaramento ocorre quando há dois sons de frequências e intensidade distintas, em que o som de maior intensidade supera o de menor, tornando-o inaudível ou não inteligível.

Assim, além do controle da reverberação e do ruído de fundo, da distância entre orador e ouvinte, e outros fatores arquitetônicos como volume, forma, uso, dentre outros, é necessário cuidar as condições acústicas dos auditórios, teatros e salas, de modo a garantir que as altas frequências não sejam muito atenuadas. Essa atenuação pode ocorrer de duas formas: pela distância entre fonte e receptor, em que à medida que a

distância aumenta acontece a atenuação da onda sonora, e no caso de grandes distâncias, pode ocorrer a absorção do som pelo ar.

2.2 COMPORTAMENTO SONORO EM AMBIENTES FECHADOS

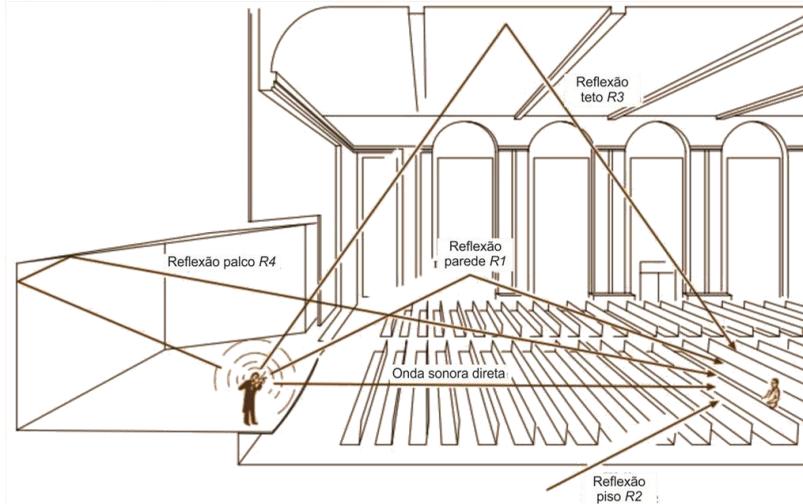
2.2.1 Som direto, primeiras reflexões e reverberação

A emissão de energia sonora se inicia com a ativação de uma determinada fonte no ambiente, a qual causa vibração das partículas em todas as direções (ondas sonoras esféricas), e diminui de intensidade com o aumento da distância, conforme já mencionado anteriormente. No entanto, quando esta onda sonora alcança o receptor é chamada de som direto e quando alcança os limites da sala podem ocorrer três casos:

- A absorção total, em que toda a energia sonora emitida pela fonte é completamente absorvida, deixando de existir por completo;
- Uma reflexão total, onde toda a energia incidida é refletida de volta ao ambiente, possibilitando a existência de ondas regressivas;
- Um comportamento intermediário, em que parte da energia emitida pela fonte é absorvida em alguma partição limite da sala, e parte é refletida. Esta é considerada a situação real dos ambientes.

Considerando, então, este caso mais real, a parte da energia sonora que foi refletida e que depois é submetida a uma série de reflexões, seja através da colisão com os limites do ambiente ou da colisão com objetos existentes no local, acaba perdendo energia sonora, passando a ser inaudível por completo em um intervalo de tempo após a fonte ter cessado. Essa sobreposição de ondas resultantes das reflexões tardias é percebida como um som contínuo, chamado de reverberação. Esse comportamento pode ser visualizado na Figura 4, em diagrama adaptado de Gade (2007).

Figura 4 - Diagrama que ilustra a geração da resposta impulso.



Fonte: (GADE, 2007), adaptado pela autora.

Dessas reflexões dentro de um ambiente, Lochner e Burger (1964) introduziram o conceito de som útil e prejudicial. A energia sonora útil é a soma ponderada da energia dos primeiros 0,095 segundos após a chegada do som direto. Enquanto que a energia prejudicial é a energia tardia, que chega após a fala do emissor acrescido do ruído de fundo da sala. Tal medida é, essencialmente, a relação som inicial e final com o ruído de fundo adicionado (BRADLEY, 1986).

Como modo de se obter um balanço entre a energia direta e reverberada é usada a absorção acústica, que é passível de controlar o tempo de reverberação, eliminar os ecos e as ressonâncias. Além disso, a absorção sonora também é útil para o controle de ruídos, reduzindo o ruído de fundo dentro do ambiente.

Na acústica arquitetônica, é relevante compreender o comportamento das ondas sonoras nos ambientes, o que é fundamental para conseguir um condicionamento acústico correto. Para isso há três teorias que buscam solucionar esse problema, são elas: a teoria da acústica geométrica, da acústica estatística e da acústica ondulatória. A primeira está relacionada a um conjunto de raios emitidos por uma fonte que se propagam no interior do ambiente similar a óptica geométrica. A segunda

trata de examinar o caminho seguido pelos raios sonoros individuais emitidos pela fonte e calcular, estatisticamente, os raios sonoros em sua totalidade. Essas duas teorias não consideram a natureza ondulatória da onda sonora, o que as diferem da terceira teoria, a qual considera o tratamento matemático da equação da onda e as condições do contorno.

O comportamento do som dentro de um ambiente ocorre a partir da relação entre as dimensões desse espaço/local e do comprimento da onda sonora, que acontece de acordo a frequência do som em questão. Para a análise prática desses ambientes em função do desempenho das ondas sonoras e dos modos acústicos da sala, conforme é apresentado na Figura 5, é necessário realizar o cálculo da Frequência de Schroeder (Equação 1) e considerar válidos os valores acima desta frequência de corte. Abaixo deste limite, os modos acústicos da sala são muito distantes, diminuindo a uniformidade de distribuição das ondas no local, conseqüentemente reduzindo a inteligibilidade da fala.

$$f_s = 2000 \sqrt{\frac{T_{60}}{V}}$$

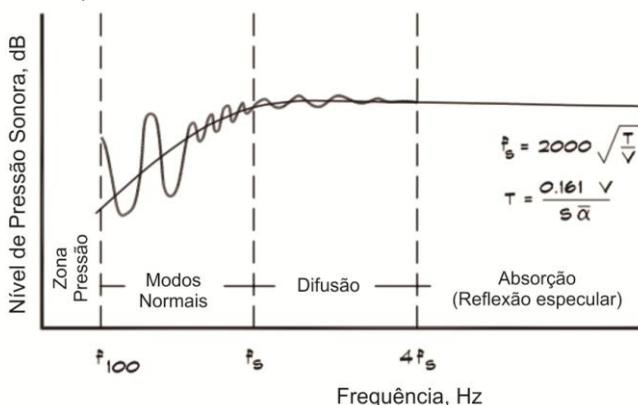
Equação 1

Sendo,

T_{60} = Tempo de reverberação [s]

V = Volume do ambiente [m^3]

Figura 5 - Resposta da sala em estado estacionário.



Fonte: (LONG, 2006).

2.2.2 Ruído de fundo

O ruído de fundo, ou ruído ambiente, pode ser considerado como aquele ruído que permeia na sala, independentemente da atividade que está sendo realizada no local, ou seja, não diz respeito ao objeto de apreciação como, por exemplo, a fonte sonora.

Apesar de ser possível reconhecer no dia a dia a influência prejudicial que determinados ruídos podem causar no desempenho de uma atividade, principalmente quando esta requer atenção e concentração, como o caso de ambientes escolares e universitários. Em Madrid, um estudo a respeito deste tema foi realizado por Tristán, Pavón e López (2012), que submeteram estudantes universitários a exames médicos antes e durante a exposição ao ruído para analisar e comparar o quanto o ruído afeta as pessoas.

Os exames citados são relacionados ao cérebro, o que permitiu conhecer as ondas produzidas por este, consideradas as fontes de informação mais completas e confiáveis para identificar o comportamento do ser humano. Os registros das ondas cerebrais durante os experimentos revelaram dados significativos sobre possíveis efeitos dos ruídos sobre a atenção. No entanto, as conclusões se tornam superficiais a medida que se percebe a influência da “memória” nos resultados de cada experimento. De qualquer forma, fica claro que, sendo o ruído de qualquer intensidade, tem repercussão no rendimento das pessoas investigadas.

A norma brasileira, NBR 10152/1987 – *Níveis de ruído para conforto acústico*, estabelece níveis de ruído de fundo compatíveis com diversos ambientes para o conforto acústico, apresentando valores de nível sonoro para conforto e nível sonoro aceitável para o uso no ambiente a que se destina, sem a interferência de ruídos no seu interior.

No caso de auditórios, o nível sonoro interno recomendado pela norma é de 35 a 45 dB(A), sendo, respectivamente, o nível recomendado e o limite aceitável para conforto acústico do local. A norma também inclui as curvas de avaliação de ruído, as chamadas curvas NC (*Noise Criteria*), para análise e identificação destes ruídos por bandas de frequência mais significativas e que necessitam de correção. Para os ambientes trabalhados, os valores NC indicados são de 30 a 35.

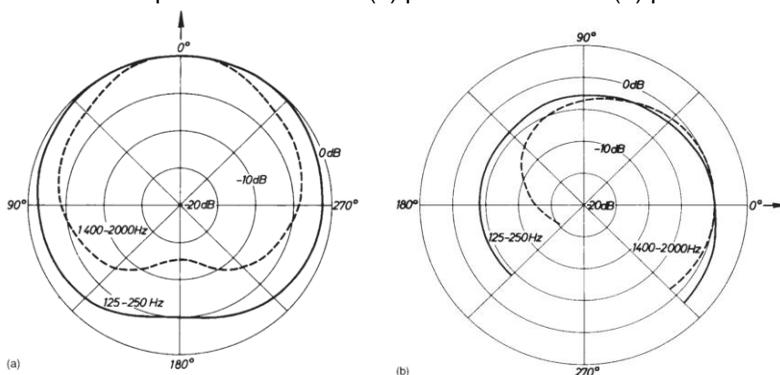
2.2.3 Palavra Falada

Já se sabe que a inteligibilidade da fala acontece pela compreensão das palavras. Estas, por sua vez, possuem potências sonoras distribuídas no espectro de frequências entre 100 e 10.000 Hz, sendo o intervalo de frequência com mais energia o de 100 a 800 Hz. Todavia, esta energia sonora não se distribui uniformemente ao redor do orador; isso ocorre devido à sombra acústica que a cabeça e o torço produzem.

A Figura 6, adaptada de Kuttruff (2009), mostra claramente a direcionalidade da palavra e a barreira acústica formada pela cabeça, podendo ser observado que as intensidades sonoras das baixas frequências (50-200 Hz) são irradiadas mais uniformemente, enquanto que as médias e altas frequências, principais no processo de compreensão da fala, se irradiam em um ângulo estreito na frente do orador (orientação pela seta). A Figura 6 (a) mostra a distribuição sonora no plano horizontal e a Figura 6 (b) no plano vertical.

Pela mesma figura é possível constatar também que existe uma perda de intensidade sonora diferente para cada grupo de frequências. Para cada 180°, no plano horizontal, nas baixas frequências há uma perda de 5 dB e nas médias frequências de 12 dB. Carvalho citado por Silva (SILVA, 2013) permite considerar também uma perda de 20 dB por cada 180° no plano horizontal nas altas frequências (4.000 Hz).

Figura 6 - Característica da direcionalidade de sons da fala para duas bandas de frequência diferentes. (a) plano horizontal e (b) plano vertical.

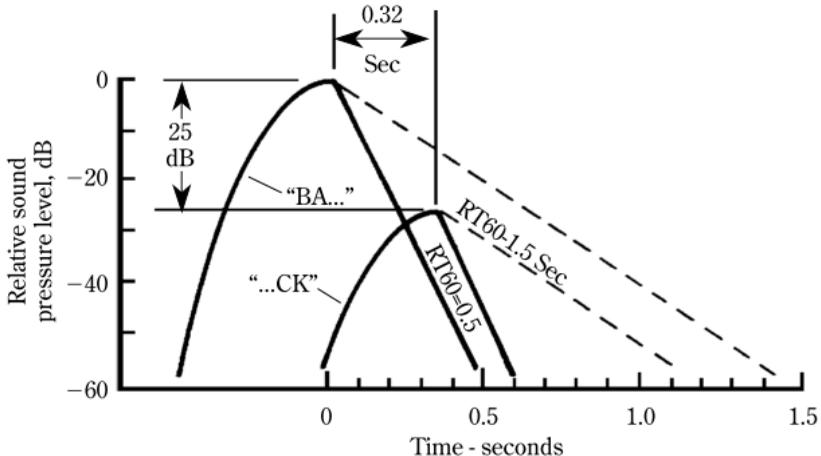


Fonte: (KUTTRUFF, 2009).

Quando uma palavra é pronunciada em locais que possuem elevado TR, a vogal que existe nela impede a percepção da consoante seguinte, visto que possui um nível sonoro maior quando comparado à consoante. Neste caso então, a consoante é sobreposta, impedindo que esta seja ouvida (SILVA, 2013).

Um exemplo citado por Everest (2001) é com a palavra inglesa *back* (Figura 7). Se a sílaba “ba” for emitida com um decaimento sonoro de 40 dB por segundo, ou seja, um decaimento sonoro provocado por um tempo de reverberação de 1,5 s (linha tracejada), esta irá apresentar um nível de pressão sonora superior a sílaba “ck” quando emitida. Esta sobreposição esconde a sílaba “ck” tornando a palavra fracamente inteligível. Se o tempo de reverberação for de 0,5 s (linha contínua), quando for emitida a sílaba “ck” esta já apresentará um nível de pressão sonora superior ao da sílaba “ba”, tornando a palavra perfeitamente inteligível.

Figura 7 - Efeito do tempo de reverberação na palavra *back*.



Fonte: (EVEREST, 2001).

Esse comportamento sonoro da sala é possível de ser identificado com maior precisão e de forma numérica e objetiva através de parâmetros acústicos que caracterizam o ambiente, e estes são impressos através da sua resposta impulsiva. Para este trabalho foram eleitos para análise os parâmetros acústicos monoaurais como: T_{30} [s] (tempo de reverberação), EDT [s]

(tempo de decaimento inicial), D_{50} [%] (definição), C_{80} [dB] (claridade musical) e STI [adimensional] (índice de transmissão da fala). Todos são conceituados e explicados a seguir.

2.3 PARÂMETROS ACÚSTICOS PARA AVALIAÇÃO AMBIENTAL

2.3.1 Resposta Impulsiva

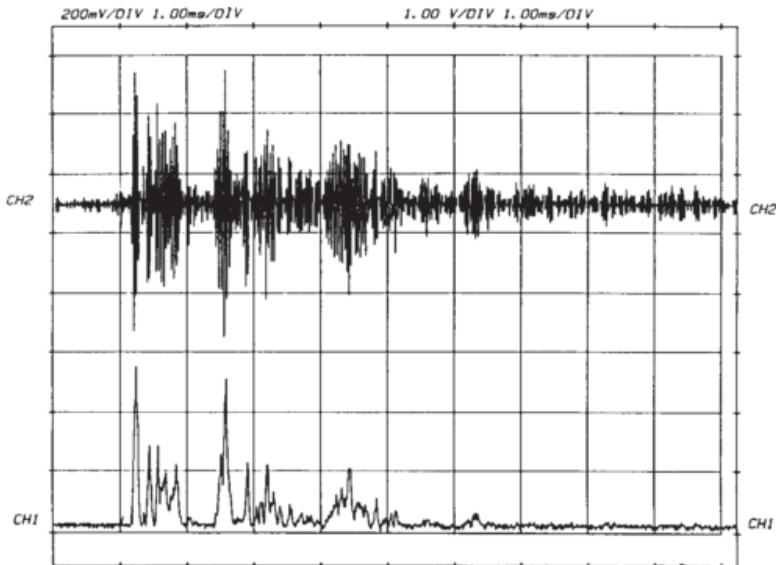
A resposta impulsiva é quando as informações a respeito de determinado ambiente são medidas através de uma fonte sonora gerada por um impulso, como por exemplo, um tiro de pistola, uma batida de palmas ou estouro de balão (método utilizado também por Rabelo (2014)), enquanto seu espectro é amplo o suficiente para satisfazer a análise dos parâmetros necessários para a caracterização do ambiente. Este método foi aplicado em estudos realizados por diversos autores, inclusive por Aretz e Orłowski (2009) em uma ocasião onde os estudos de casos eram pequenas salas de concertos da Universidade de Cambridge. Isto mostra a viabilidade de utilização do método para ambos os usos, seja música ou fala.

Segundo Anders (2007), Long (2006), Dragonetti, Ianniello e Romano (2009), Muller (2007), e Rocha e Brandão (2014), a resposta impulsiva contém uma grande quantidade de informações em seu espectro indicadas pelo tempo, nível de pressão sonora no espectro e direção de incidência, que permite melhores resultados para as análises dos parâmetros e permite definir completamente as propriedades de um sistema, como uma sala. Muller (2005) complementa que a resposta impulsiva entre dois pontos descreve todas as características lineares do caminho de transmissão. De certa forma, todas as informações sobre reflexões e reverberação devem, então, estar embutidas nela.

A Resposta Impulsiva do Recinto (RIR), como explica Ferreyra *et al.* (2014), é o método para geração do sinal acústico utilizado na atualidade para medir o Tempo de Reverberação (TR) e os demais parâmetros acústicos de ambientes. A norma ISO 3382/2009 é documento de referência que estabelece as recomendações para realizar cada medição em nível internacional. De acordo com essa norma, a fonte de impulso deve ser capaz de produzir um nível de pressão sonora pico

suficiente para garantir uma curva de decaimento, pelo menos, 45 dB acima do ruído de fundo na banda de frequência de interesse, para avaliação do tempo de reverberação. A Figura 8 apresentada por Kuttruff (2009), mostra o comportamento da resposta impulsiva que é constituída por uma área direta e perfeitamente reverberante, que se decompõe a uma velocidade definida pelo tempo de reverberação.

Figura 8 - Resposta impulsiva em um ambiente nos 400 ms iniciais.

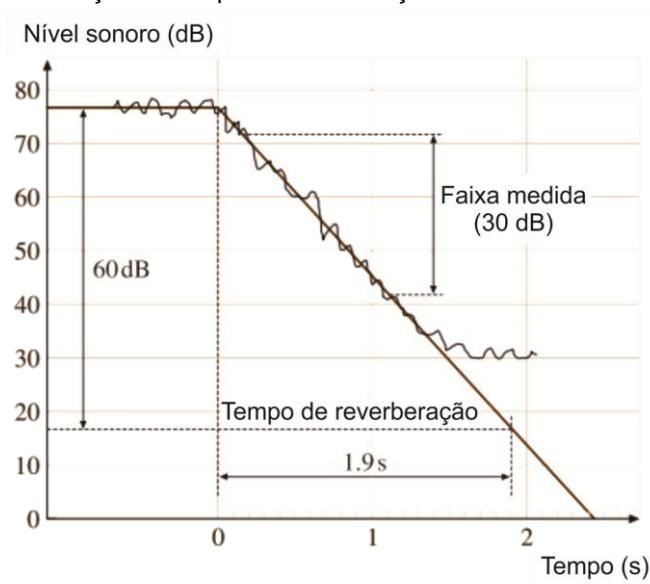


Fonte: (KUTTRUFF, 2009).

2.3.2 Tempo de Reverberação

Descoberto há aproximadamente 110 anos por Wallace Clement Sabine, o tempo de reverberação (TR) é definido como o tempo necessário para o nível de pressão sonora existente em uma sala decair 60 dB, ou seja, tempo necessário até que o som passe a ser inaudível, como representado na Figura 9. Isso acontece a partir do momento em que uma fonte sonora ligada em um ambiente é cessada. Este tempo de permanência do som no ambiente é quantificado pelo tempo de reverberação.

Figura 9 - Definição do tempo de reverberação.



Fonte: (GADE, 2007), adaptado pela autora.

De acordo com Hodgson e Nosal (2002) há duas abordagens principais que são usadas para determinar o tempo de reverberação ideal para a inteligibilidade, que são o método experimental e a predição teórica. O método experimental acontece por meio da utilização da resposta impulsiva e equipamentos. Já a predição teórica é realizada com as equações de tempo de reverberação que, segundo Servín, Sánchez e Ávila (2014) são partes fundamentais no processo de projeto de condicionamento acústico e de determinação da absorção acústica necessária. Este posicionamento a respeito da importância do parâmetro TR na acústica de salas também é mantido por outros autores como Viveiros (1995), Long (2006), Cowan (2007), Barron (2010), Bastos (2010), Mansilla *et al.* (2014), entre outros. No caso de projeto de condicionamento acústico, o processo frequentemente utiliza as equações de Sabine e Norris-Eyring para o cálculo do TR.

A fórmula de Sabine, apresentada na Equação 2, considera as características do local, como o volume da sala e a absorção dos materiais presentes no mobiliário e revestimentos do ambiente. O coeficiente 0,161 está relacionado com a

temperatura do ar, que influencia na velocidade de propagação das ondas sonoras no ar.

$$TR = \frac{0,161 \times V}{A + 4mV} = \frac{0,161 \times V}{(\sum \alpha_i \times S_i) + 4mV}$$

Equação 2

Onde:

TR = tempo de reverberação (s);

V = volume da sala (m³);

A = absorção total da sala (sabines/m²);

α_i = coeficiente de absorção sonora de um determinado material;

S_i = área do material (m²);

m = absorção do ar (m⁻¹).

No caso de ambientes com muita absorção, como um caso limite, por exemplo, uma sala totalmente absorvente, o tempo de reverberação deveria ser nulo. Isto não acontece com a equação de Sabine, pois foi observado que quando o coeficiente de absorção médio é superior a 0,2, ocorrem erros superiores a 10% na fórmula de Sabine (LLINARES; LLOPIS; SANCHO, 1996; LONG, 2006).

Para estes casos, em 1930, Carl Eyring desenvolveu outra expressão para o tempo de reverberação, mostrada na Equação 3, que leva em conta o comprimento de onda e a sua velocidade de propagação, o que resulta em quantidade de reflexões para cada “barreira” que a onda encontrar. Essas reflexões, por sua vez, teriam suas energias absorvidas pelas superfícies e materiais presentes no ambiente a cada reflexão, restando uma energia de (1- α). A mesma onda sonora, se refletir duas vezes, a sua energia será de (1- α)², ou seja, é reduzida exponencialmente (LONG, 2006; SILVA, 2013).

$$TR = \frac{0,161 \times V}{-S_T \times \ln(1 - \bar{\alpha}) + 4mV}$$

Equação 3

Onde:

TR = tempo de reverberação (s);

V = volume da sala (m³);

S_T = área total da sala (m²);

$\bar{\alpha}$ = coeficiente de absorção sonora médio da sala;

m = absorção do ar (m⁻¹).

E sendo,

$$-\ln(1 - \bar{\alpha}) = \bar{\alpha} + \frac{\bar{\alpha}^2}{2} + \frac{\bar{\alpha}^3}{2} + \dots \cong \bar{\alpha}$$

Equação 4

Pelo fato desta expressão de Eyring fazer uso de um coeficiente de absorção médio dos materiais, isto torna esta fórmula mais adequada ao uso somente quando existem superfícies com coeficientes de absorção aproximadamente idênticos. Para suprir situações em que isto não acontece (mais real), foi desenvolvida em 1932 a fórmula de Millington-Sette, mostrada na Equação 5.

$$TR = \frac{0,161 \times V}{-S_T \ln \left[1 - \sum \frac{S_i \alpha_i}{S_T} \right]}$$

Equação 5

Em que:

- TR = tempo de reverberação (s);
- V = volume da sala (m³);
- S_T = área total da sala (m²);
- α_i = coeficiente de absorção sonora de um determinado material;
- S_i = área do material (m²);
- m = absorção do ar (m⁻¹).

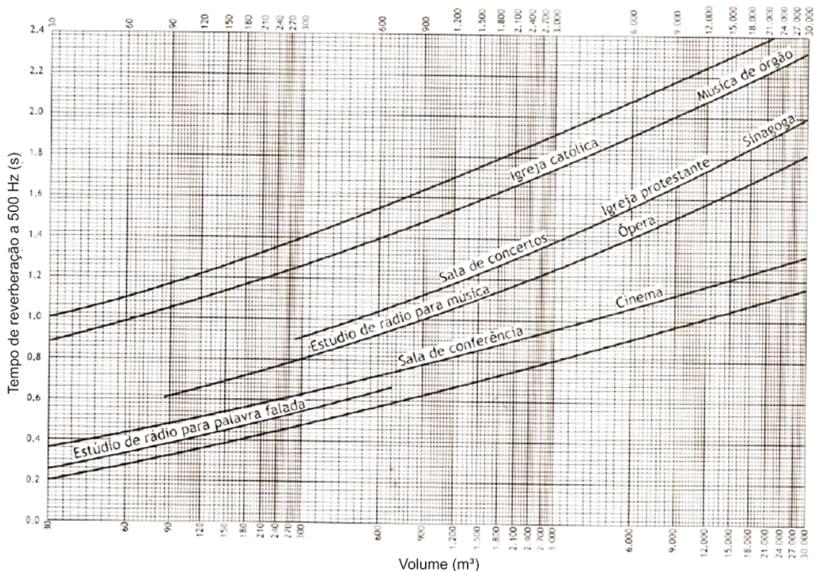
Esta fórmula mostra-se mais adequada quando os coeficientes de absorção do espaço são bastante distintos, pois assume um somatório de todos os coeficientes de absorção dos diversos materiais, o que a torna mais adequada para situações convencionais (LONG, 2006; SILVA, 2013).

O valor final do tempo de reverberação, frequentemente é avaliado através do chamado “tempo ótimo” ou “tempo ideal”. A Figura 10, retirada da Bistafa (2011), mas que originalmente é da NBR 12179 (1992), permite a verificação do tempo de reverberação ideal para 500 Hz de um ambiente em função do seu volume e uso principal. Para as demais frequências é utilizada a Figura 11, para conversão dos valores de acordo com a porcentagem para 500 Hz.

Segundo Long (2006), o ideal para a fala são tempos de reverberação baixos. Valor elevado de tempo de reverberação, como já foi dito, pode dificultar o ato de distinguir os sons e as palavras, visto que as sílabas vão se sobrepondo uma nas

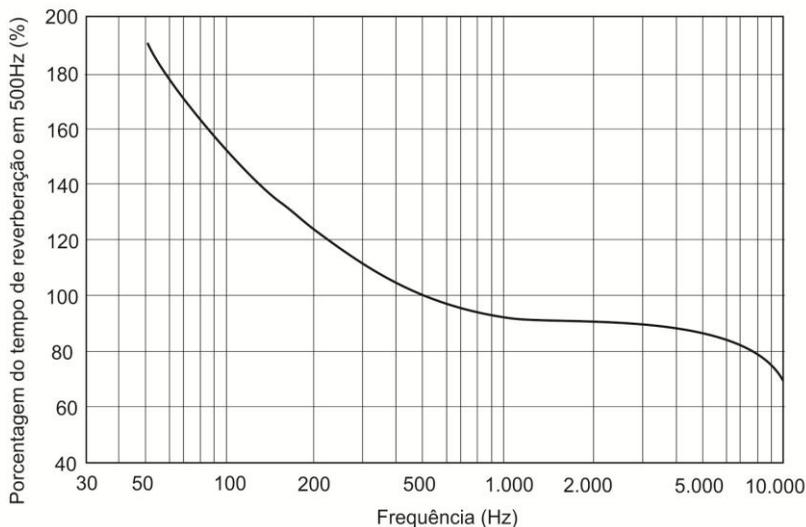
outras, podendo interferir na inteligibilidade. No caso de salas de aula e pequenas salas de leitura, por exemplo, tempos iguais ou menores que um segundo são preferidos. Entretanto, não há um tempo de reverberação único e perfeito para todos os usos de um determinado ambiente. Assim, uma variação de 5 a 10% dos valores “ideais” são aceitáveis.

Figura 10 - Tempo de reverberação ótimo para 500 Hz.



Fonte: (NBR 12179, 1992, *apud* BISTAFA, 2011)

Figura 11 - Valor percentual para conversão dos tempos de reverberação.



Fonte: (BISTAFA, 2011), adaptado pela autora.

2.3.3 Tempo de decaimento inicial (EDT)

O tempo de decaimento inicial é definido como sendo seis vezes o intervalo de tempo correspondente ao decaimento médio entre 0 dB e 10 dB, após a fonte ter cessado a emissão sonora. Para Bastos (2010), o fato de se analisar apenas a gama de 10 dB está relacionado com questões psicoacústicas, pelo fato de que em eventos musicais, por exemplo, o ouvido humano não distingue variações de energia superiores a 10 dB. Além disso, Gate (2007) explica que a taxa de decomposição é muitas vezes diferente no início e na parte inferior da curva de decaimento. Isso acontece porque durante a música ou fala, a parte posterior ou mais fraca da reverberação será mascarada pela próxima sílaba ou nota musical.

Assim como o tempo de reverberação (TR), esse índice se relaciona com a quantidade de reflexões, difusões e clareza das ondas sonoras no auditório, o que acarretará em um valor muito próximo ao valor de TR, porém, o EDT (*Early Decay Time*) pode ser considerado mais significativo e relacionado à percepção de “reverberância” enquanto que o tempo de reverberação está

mais relacionado com as propriedades físicas do auditório (CRAVERO *et al.*, 2014; ISO 3382-1, 2009).

2.3.4 Inteligibilidade da fala (SI)

Uma maneira para definir o SI (*Speech Intelligibility*) de modo direto e quantitativamente mensurável é que o “SI é a proporção de itens da fala (ex. sílabas, palavras ou sentenças) corretamente repetidos pelo ouvinte para um dado teste de inteligibilidade da fala” (BRAND, 2008). Diferentemente da qualidade sonora, a inteligibilidade está relacionada com o número de itens da expressão falada que são compreendidos corretamente pelo ouvinte, enquanto que a qualidade sonora está relacionada com a qualidade do sinal reproduzido, tendo em conta a quantidade de distorções audíveis (ALVES, 2008).

Para Hodgson e Nosal (2002), a grande preocupação em relação às características acústicas de salas de aula é a inteligibilidade da fala; e, sempre que existe comunicação verbal de uma mensagem entre um emissor e um receptor é possível que a mensagem chegue ao receptor de modo pouco inteligível. Isso se deve ao meio de transmissão utilizado (SILVA, 2013). Brand (2008), Long (2006) e Voran (2008), afirmam que a inteligibilidade da fala é a medida direta do número de palavras ou frases compreendidas por um ouvinte. De uma forma ainda mais aprofundada, segundo Isbert (1998), a inteligibilidade do discurso trata-se da correta percepção das consoantes de uma mensagem oral.

No início da década de 70, o pesquisador holandês V.M.A. Peutz levou a fundo seu estudo para estabelecer uma fórmula para o cálculo da inteligibilidade. Em sua pesquisa, determinou a Porcentagem de Perda de Articulação de Consoantes, o que é o mesmo que %ALCons (*Articulation Loss of Consonants*), podendo dizer que ao se tratar de um parâmetro indicativo de uma perda, quanto maior for o valor, pior será o grau de inteligibilidade existente. Posteriormente Peutz, em um segundo momento da pesquisa, concluiu que o valor de %ALCons podia ser determinado a partir do conhecimento do tempo de reverberação e da diferença de níveis de pressão sonora do campo direto e do campo reverberante em um determinado ponto.

Hodgson (2004) mostra que quando a energia sonora inicial complementa o som direto e compensa o ruído de fundo, melhora a inteligibilidade da fala. Por outro lado, a energia tardia mascara o som direto, aumentando de modo considerável o ruído de fundo, diminuindo assim, a inteligibilidade. Isto mostra que ambos estão diretamente vinculados à percepção da fala. É importante ressaltar que, geralmente, este parâmetro (%ALCons) é calculado na banda de frequência de 2000 Hz, por ser considerada a banda que possui máxima contribuição para o entendimento da palavra.

Além da energia tardia, outro fator que contribui substancialmente para a perda de inteligibilidade é o ruído de fundo. Segundo Isbert (1998), de um ponto de vista prático, sem entrar em aspectos quantitativos, considera-se que seu efeito é desprezível quando o nível sonoro correspondente ao ruído de fundo está, no mínimo, 12 dB abaixo do nível sonoro da fonte. Long (2006) adota esse valor como sendo 25 dB. Nesse caso, quando acontece do som estar a menos de 25 dB de diferença do ruído de fundo, este interfere no entendimento da palavra falada. Quanto menor for essa diferença, maior será a influência do ruído indesejável. Caso o nível de pressão sonora da fonte seja superior aos 25 dB acima do ruído de fundo, não há nenhuma degradação na audibilidade e este é, então, descartado.

Mesmo com tamanha importância já apresentada a respeito do ruído de fundo na sua influência sobre a audibilidade da fala, quando palavras são ditas em uma sala, a quantidade de reflexões das paredes e outras superfícies também poderá acarretar um efeito negativo para a inteligibilidade da fala.

Para a medição da Inteligibilidade da Fala (SI) é importante estar em silêncio. Isso acarreta a necessidade de que o ruído de fundo e a reverberação devem ser minimizados usando, por exemplo, cabines acústicas e fones de ouvido altamente isolados, quando realizados testes com audiência. Por outro lado, as medições podem ser utilizadas para investigar especificamente a influência de diferentes ruídos e a acústica da sala, que é importante para o chamado “efeito coquetel” (BRAND, 2008). Este efeito acontece quando um som sobrepõe ou se adiciona ao outro. Um exemplo prático é dado por vários grupos de pessoas conversando em um ambiente fechado, em

que uma conversa pode se somar a outra, causando um ruído indesejado.

A importância da inteligibilidade da fala passa também por sua análise subjetiva. A título de curiosidade, pois não será utilizado nesse trabalho por se tratar de teste subjetivo. A precisão de sua medição pode ser dada pela distribuição binomial, mostrada na Equação 6, em que o erro padrão ($se(SI)$ – “*Standard error of a SI*”) da estimativa de SI é baseada em n itens e determinada por:

$$se(SI) = \sqrt{\frac{SI(1 - SI)}{n}}$$

Equação 6

Em que,

$se(SI)$ = Erro padrão do SI ;

SI = Inteligibilidade da fala;

n = quantidade de itens de influência.

Para diminuir o máximo possível o erro padrão, deve-se procurar elaborar o teste com a maior homogeneidade, ou seja, o SI de todos os itens deve ser o mais homogêneo possível.

2.3.5 Índice de transmissão da fala (STI)

O *speech transmission index* (STI) ou índice de transmissão da fala, que é um correlato físico do SI , expressa o grau de alteração da profundidade de modulação em amplitude sofrida pelo sinal da fala, causada pela reverberação e pelo ruído de fundo. É também uma importante variável muito utilizada na descrição a respeito da inteligibilidade da fala, que segundo Zhu, Mo e Kang (2014) e Bastos (2010), é a mais completa.

Existem diversos testes para a avaliação desta inteligibilidade, podendo dividir-se em: testes objetivos e subjetivos. Os testes subjetivos, com a utilização de locutores e ouvintes, baseiam-se em leituras de frases ou palavras para um grupo que as escreve e conforme a maior frequência de acertos, maior será a inteligibilidade do local. Esta abordagem, segundo Steeneken e Houtgast (1980) tem a vantagem óbvia de sua franqueza. No entanto, existem algumas desvantagens graves, tais como a necessidade de um grande número de oradores e ouvintes treinados.

Os testes objetivos baseados em parâmetros físicos do meio de transmissão sonora são realizados por aparelhos, não necessitando da resposta humana, e conseqüentemente apresentando menor probabilidade de erros. Em contraste, os métodos objetivos utilizam também maneiras indiretas de medição através da modelagem matemática com as características da fala em conjunto com a avaliação de respostas acústicas impulsivas de ambientes ou sistemas de comunicação. (ROCHA; BRANDÃO, 2014)

Em outras palavras, é a medida de transmissão voz-som entre uma fonte de expressão falada e um microfone, e o quanto essa relação é distorcida pelo ruído de fundo e pela reverberação. (HODGSON, 2004) Esta consideração do ruído de fundo e a reverberação permite o destaque deste parâmetro em relação aos demais para a avaliação da inteligibilidade da fala em ambientes. Lembrando que uma boa inteligibilidade da fala é objetivo principal em ambientes em que a comunicação verbal tem elevada importância, como é o caso de salas de aula, salas de conferência, auditórios, aeroportos e centros de trabalhos, por exemplo.

Houtgast e Steeneken (1985), e Kitapci, Galbrun, Rourke et al. (2013), definem o STI como uma métrica física objetiva que mede a qualidade de transmissão da voz, em função da transferência de modulação (MTF). Essa função foi desenvolvida como forma matemática e eletrônica para replicar as diversas propriedades da fala humana, considerada complexa. Um exemplo apresentado por Long (2006) é de que a vibração das nossas pregas vocais produz ruído em banda de frequência, e nossa boca tem a função de modular as várias frequências em palavras.

Quando um sinal sonoro é transmitido para um ouvinte, ele pode ser alterado pelo ambiente, causando redução da inteligibilidade. Isso acontece devido aos já citados: ruído de fundo e reverberação no interior do ambiente. À medida que essas interferências vão acontecendo na onda sonora, sua modulação fica alterada, causando a redução da modulação, caracterizado pelo fator de redução da modulação $m(F_m)$ expresso na Equação 7, que ocorre em função da frequência de modulação F_m , com valores entre 0,63 Hz e 12,5 Hz, em intervalos de terço de oitava, de modo a coincidirem com a fala humana. A perda dessa modulação reproduz a perda de

modulação da voz falada. Portanto, constitui uma medida da perda de inteligibilidade, e seu valor pode variar de 0 a 1 (100% de redução da modulação).

Bradley (1986) apresenta três tipos diferentes de medidas acústicas que foram comparadas para caracterizar a inteligibilidade da fala de salas com tamanhos e condições acústicas variadas. Sua pesquisa incluiu os dados da relação sinal-ruído, o índice de transmissão da fala derivados das variações de função de modulação, e razões entre sinal de entrada e saída do som, considerando inclusive o ruído de fundo e a intensidade do som da fala. Os 3 tipos de medidas mostraram forte correlação entre si, porém os valores de relação sinal-ruído ponderado em A e o valor de TR em 1 kHz permitiram o sucesso na obtenção dos valores de STI.

A norma IEC 60268-16 especifica que 98 sinais devem ser usados como sinais de entrada determinados através de um ruído de banda larga filtrado em bandas de oitava, com frequências centrais entre 125 Hz a 8 kHz, o que resulta em 7 sinais. Cada um desses 7 sinais é multiplicado por 14 sinais de frequência de modulação. Para se obter os 98 sinais de saída que comporão a matriz dos índices de modulação deve-se fazer a convolução dos 98 sinais de entrada com a resposta impulsiva da sala do qual se deseja extrair o STI. (HOUTGAST; STEENEKEN, 1985; LONG, 2006; ROCHA; BRANDÃO, 2014)

$$m(F_m) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left[2\pi F_m \frac{TR}{13,8}\right]^2}} \cdot \frac{1}{1 + 10^{(-S/N)/10}}$$

Equação 7

Onde,

F_m = frequência de modulação (Hz);

TR = tempo de reverberação (s);

S/N = relação sinal-ruído (dB).

A Equação 7 indica que m depende de duas variáveis mensuráveis e presentes no meio de transmissão, ou seja, a relação sinal-ruído (S/N) que tem em conta o ruído de fundo, e o tempo de reverberação (TR).

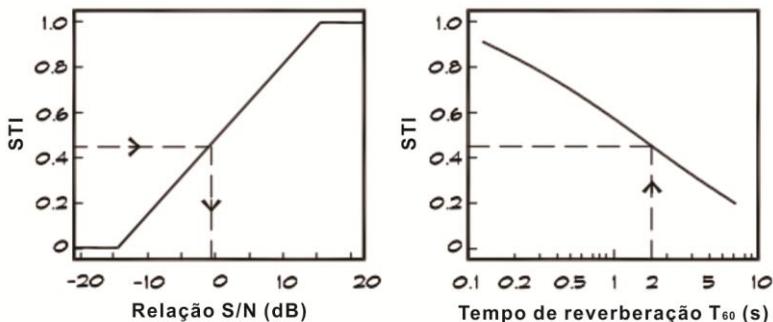
Quando o ruído de fundo é a fonte principal de distorção, o efeito sobre a redução da modulação aparece em termos de uma relação sinal-ruído, que é independente da frequência de

modulação. O ruído age como um atenuador na MTF. Quando a distorção é produzida pela reverberação, a redução de modulação exibe um efeito de filtro passa-baixa, com flutuações rápidas sensíveis aos efeitos da reverberação (principalmente nas altas frequências). O fator de redução da modulação é determinado matematicamente como o produto destes dois efeitos (relação sinal-ruído e tempo de reverberação) para um sinal não amplificado. (LONG, 2006; MÜLLER, 2005)

O valor total da relação sinal-ruído ponderado em A ($S/N(A)$) é o nível de pressão sonora total da fala menos o nível de pressão sonora total do ruído de fundo, na posição do ouvinte com a sala desocupada. Como valor ideal para essa relação tem-se em média 15 dB(A), para casos em que o ouvinte possui audição normal. Todos os valores S/N são limitados a uma faixa de ± 15 dB. Isso significa que um valor muito bom, que ultrapassa 15 dB, é fixado em 15 dB, e que um valor péssimo, que está abaixo de -15 dB, é ajustado em -15 dB. (HODGSON; NOSAL, 2002; HODGSON, 2004; MÜLLER, 2005)

De acordo com a Figura 12 é possível verificar o comportamento do STI com a relação sinal-ruído e o TR.

Figura 12 - Comportamento do STI com a relação sinal-ruído e com o TR.

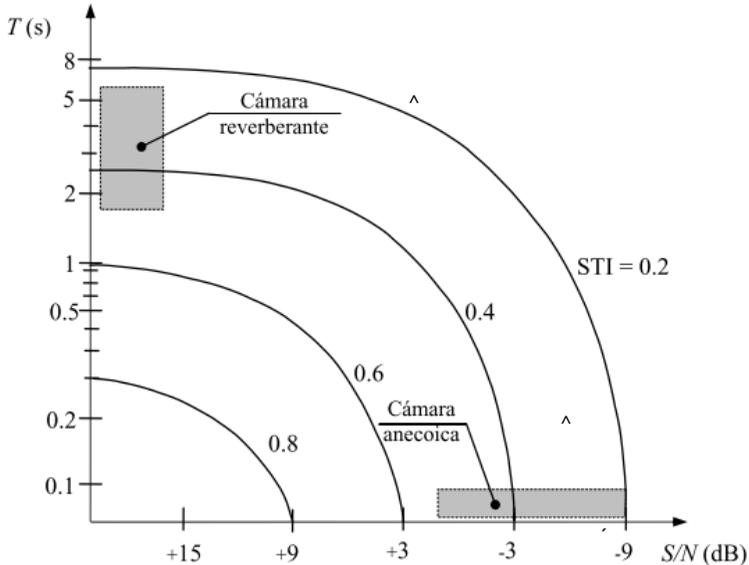


Fonte: (LONG, 2006), adaptado pela autora.

Sommerhoff e Rosas (2012) identificaram uma relação expressa na Figura 13, em que as curvas de STI foram graficadas em função do tempo de reverberação e a relação sinal-ruído. Com ela é importante destacar que para qualquer $S/N > 15$ dB as curvas de STI são praticamente horizontais (especialmente com tempo de reverberação alto), e que para

qualquer $T < 0,2$ s, as curvas de STI são praticamente verticais (especialmente para relação sinal-ruído baixo).

Figura 13 - Curvas de STI em relação ao tempo de reverberação e relação sinal-ruído.



Fonte: (SOMMERHOFF; ROSAS, 2012), adaptado pela autora

Resgatando o elo entre a função de transferência da modulação (MTF) e a inteligibilidade da fala, Long (2006), Houtgast e Steeneken desenvolveram um algoritmo para transformar os valores de m para valores de índice de transmissão da fala (STI). Esse algoritmo é apresentado na Equação 8 e considera a relação sinal-ruído aparente como valor causador da variação do ruído emitido pela fonte.

$$L_{SNapp} = 10 \log \frac{m(F_m)}{1 - m(F_m)}$$

Equação 8

Onde:

L_{SNapp} = nível sinal ruído aparente (dB);

$m(F_m)$ = fator de redução da modulação.

Desta, parte-se para o somatório dos resultados nas sete bandas de frequências (125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 Hz), tem-se a Equação 9:

$$\overline{L_{SNapp}} = \sum_{i=1}^7 w_i (L_{SNapp})_i$$

Equação 9

Onde:

$\overline{L_{SNapp}}$ = média da relação sinal-ruído aparente (dB);

w_i = ponderação por bandas de oitava de 125 Hz a 8 kHz (0,13, 0,14, 0,11, 0,12, 0,19, 0,17 e 0,14).

Assim, o Índice de Transmissão da Fala pode ser expresso pela Equação 10:

$$STI = [\overline{L_{SNapp}} + 15] / 30$$

Equação 10

Com isso, segundo Long (2006), para cada modulação de frequência uma relação sinal-ruído e STI podem ser calculados.. Os valores de STI são classificados entre 0 (completamente ininteligível) e 1 (ótima inteligibilidade), de acordo com a norma regulamentadora IEC 60268-16 (2011), com as categorias razoável (0,45 a 0,60) e bom (0,60 a 0,75). A Tabela 4, mostra que é possível fazer a transcrição dos valores de inteligibilidade para uma avaliação subjetiva.

Os 7 valores de $\overline{L_{SNapp}}$ são os índices de inteligibilidade da fala sem a aplicação das características das vozes masculinas e femininas (ponderações) em função das bandas de frequências de oitava. Para o cálculo com ponderação em função do sexo do locutor utiliza-se a Equação 11.

$$STI = \sum_{n=1}^7 \alpha_n \cdot L_{SNapp\ n} - \sum_{n=1}^6 \beta_n \sqrt{L_{SNapp\ n} \cdot L_{SNapp\ n+1}}$$

Equação 11

O STI é obtido pelo somatório ponderado do $\overline{L_{SNapp}}$ para as bandas de oitava e, pelo termo de redundância. As ponderações α e β dependem do sexo do locutor que são definidos pela língua inglesa e apresentados na Tabela 3. (MÜLLER, 2005; ROCHA; BRANDÃO, 2014)

Tabela 3 - Fatores de ponderação específicos para homens e mulheres em bandas de oitava.

Bandas de oitava (Hz)		125	250	500	1 k	2 k	4 k	8 k
Masculino	α	0,085	0,127	0,230	0,233	0,309	0,224	0,173
	β	0,085	0,078	0,065	0,011	0,047	0,095	-
Feminino	α	-	0,117	0,223	0,216	0,328	0,250	0,194
	β	-	0,099	0,066	0,062	0,025	0,076	-

Fonte:(IEC 60268-16, 2011), adaptado pela autora.

A banda de 125 Hz não é considerada para mulheres em função da voz ser basicamente a partir de 150 Hz. Para os dois sexos, pesos maiores são dados nas bandas de oitava entre 500 Hz e 4 kHz.

Tabela 4 - Classificação do STI quanto à avaliação subjetiva

STI [adimensional]	
Intervalo	Qualidade
0,00 a 0,30	Ruim
0,30 a 0,45	Pobre
0,45 a 0,60	Razoável
0,60 a 0,75	Bom
0,75 a 1,00	Excelente

Fonte: (IEC 60268-16, 2011) adaptado pela autora.

O elo até então perdido entre a função de transferência de modulação (MTF) e inteligibilidade da fala é dada através do índice de transmissão da fala (STI), que é semelhante a um índice de articulação (AI – a ser apresentado a seguir) ou uma perda percentual de consoantes (%ALCons). Todos os três são procedimentos numéricos utilizados para quantificar a inteligibilidade da fala.

2.3.6 Índice de articulação da fala (*Articulation Index*)

Diferentemente do STI, mas também ligado à qualificação da inteligibilidade da fala, o índice de articulação da fala (*articulation index*, AI) é um método de estimativa da inteligibilidade na presença do ruído, calculado pela Equação 12. Segundo Long (2006), este índice é a probabilidade de compreender um som individualmente. French e Steinberg desenvolveram o conceito do Índice de Articulação da fala, considerando que a parte mais importante da fala compreende-

se nas frequências de 200 a 6100 Hz (SILVA, 2013). No entanto, tal índice não será utilizado neste trabalho, mas cabe informar que sua existência, por ser considerado um parâmetro vinculado à palavra falada, é condição de uso dos ambientes abordados para análise nesta dissertação de mestrado.

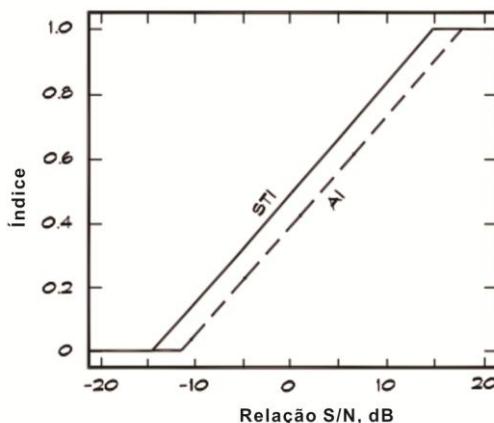
$$AI = \sum (\text{relação } S/N \times \text{fator de ponderação})$$

Equação 12

De acordo com Bistafa (2011), Mehta, Johnson e Rocafort (1999), e Long (2006) o AI trata de um valor único, obtido a partir dos espectros do ruído e dos sons da fala. O método de cálculo consta na norma ANSI S3.5, revisada no ano de 2000 e nomeada *Methods for calculation of the speech intelligibility index*, e é apresentada acima através da Equação 12, adaptada de Mehta, Johnson e Rocafort (1999). Este número varia entre 0 e 1, resultante de um procedimento de cálculo no qual é feita a diferença entre valores de níveis de pressão sonora da fala e do ruído em cinco bandas de frequência. Após, é realizada a ponderação em cada banda e, por fim, os valores finais são somados.

O índice de articulação da fala possui uma forte correlação com a inteligibilidade da fala. Esta está representada na Figura 14, apresentada por Long (2006).

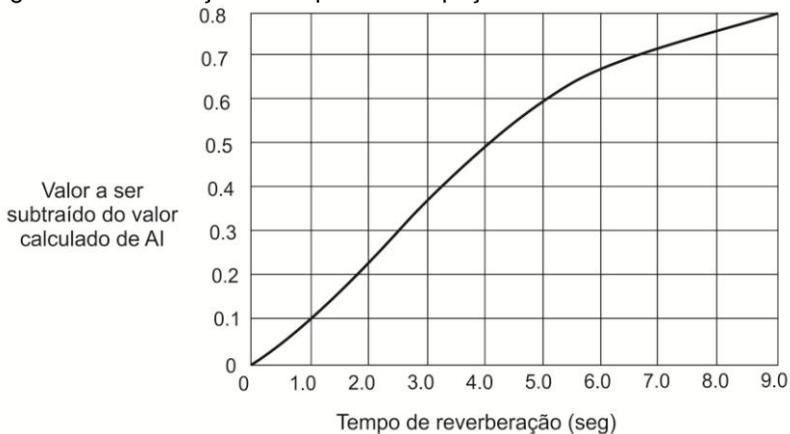
Figura 14 - Comparação do índice de articulação (AI) com índice de transmissão da fala (STI).



Fonte: (LONG, 2006), adaptado pela autora.

Assim como em qualquer outro parâmetro acústico em que se sabe que reflexões acima de um período de tempo após o som direto afetam na reverberação do ambiente e este, conseqüentemente, na inteligibilidade da fala, no AI não é diferente. Este deve considerar o tempo de reverberação do local em seu cálculo. Para isso, a Figura 15 apresenta um fator de correção que deve ser aplicado no resultado do AI, para então se obter o valor real deste parâmetro de caracterização da fala no ambiente.

Figura 15 - Correlação de AI para um espaço reverberante.



Fonte: (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999) adaptado pela autora.

2.3.7 Definição (D_{50})

Além da inteligibilidade da fala, a Definição (D_{50}) também auxilia na caracterização acústica do ambiente estudado. Sua importância, segundo Bistafa e Bradley (2000), reside do fato de que representa a primeira tentativa de quantificar numericamente a influência da acústica de salas na inteligibilidade da fala.

Trata da relação entre a energia que chega ao ouvinte dentro dos primeiros 50 ms e a energia total recebida pelo mesmo (CRAVERO et al., 2014), desconsiderando os efeitos nocivos do ruído de fundo (BISTAFA; BRADLEY, 2000). O seu valor é compreendido entre 0 e 100%; quanto maior o valor de D_{50} , maior será a capacidade do ouvinte distinguir cada sílaba. Isbert (1998) afirma que os valores acima de 50% são considerados aceitáveis para qualquer tipo de uso do local.

Segundo Cravero et al. (2014) este parâmetro também se altera na condição de “sala ocupada”, aumentando os valores de definição nas frequências acima de 1000 Hz.

De um modo geral, um ambiente que apresenta um índice de Definição pequeno pode ser classificado como pouco íntimo, e este fato, normalmente, deve-se a um excesso de reverberação (sala muito viva). Segundo Custodio (2004) e Tang (2008), para altos valores, pode-se concluir que a sala está mais adequada para a fala, como é o ideal para salas de teatro ou salas de conferência, ou seja, D_{50} precisa ser igual ou superior a 0,65.

2.3.8 Clareza (C_{80})

A clareza (C_{80}) é o quociente, em decibel, entre a energia recebida nos primeiros 80 ms do sinal percebido pelo ouvinte e a energia recebida após esse intervalo de tempo. É mais indicado para salas com fins musicais, característica que a diferencia da Definição (D_{50}).

Segundo Gate (2007), a clareza descreve o grau em que cada detalhe do comportamento do som pode ser percebido em oposição a tudo que está sendo adicionado tardiamente à ele, compondo sons reverberantes. Portanto, quanto maior for o valor de C_{80} , maior a impressão de clareza. O limite perceptível de diferença em C_{80} é cerca de 0,5 dB. Como valores recomendados, pela norma ISO 3382-1 / 2009, tem-se o intervalo entre -5 dB e 5 dB.

Para esse trabalho, o parâmetro C_{80} foi mantido com a intenção de qualificar os auditórios, visto que em determinados eventos poderão ser realizadas apresentações com músicas.

A Figura 16 apresenta um quadro resumo de todos os parâmetros citados.

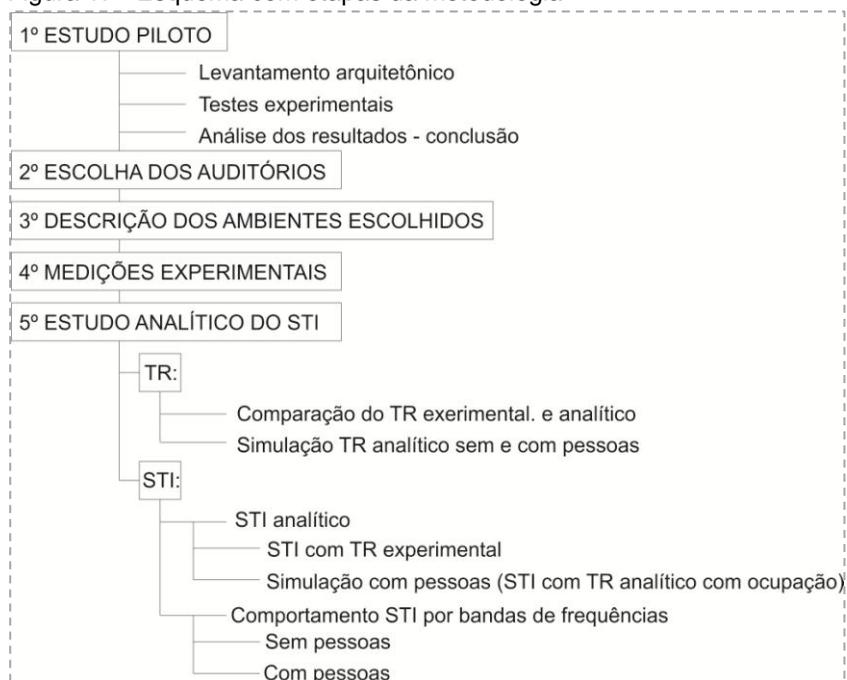
Figura 16 - Quadro resumo dos parâmetros acústicos

Parâmetros acústicos	Conceito
Tempo de Reverberação (TR)	É definido como o tempo necessário para o nível de pressão sonora existente em uma sala decair 60 dB, a partir do momento em que uma fonte sonora é cessada.
Tempo de Decaimento Inicial (EDT)	Caracteriza a parte inicial da curva de decaimento energético. É seis vezes o intervalo de tempo correspondente ao decaimento médio entre 0 dB e 10 dB após a fonte ter cessado.
Definição (D50)	Trata da relação entre a energia que chega ao ouvinte dentro dos primeiros 50 ms e a energia total recebida pelo mesmo. São as 'reflexões úteis' que dão suporte ao som direto.
Inteligibilidade da fala (SI)	É a proporção de itens da fala corretamente compreendidos e repetidos pelo ouvinte para um dado teste de inteligibilidade da fala. Avaliado através de testes subjetivos.
Índice de transmissão da fala (STI)	É o correlato físico do SI. Expressa o grau de alteração da profundidade de modulação em amplitude sofrida pelo sinal da fala, causada pela reverberação e pelo ruído de fundo.
Índice de articulação da fala (AI)	É um método de estimativa da inteligibilidade na presença do ruído. É a probabilidade de compreender um som individualmente.
Clareza (C80)	É o quociente em dB entre a energia recebida nos primeiros 80 ms do sinal percebido pelo ouvinte e a energia recebida após esse intervalo de tempo. Similar à Definição, porém indicado para fins musicais.

Fonte: Elaborado pela autora.

3 METODOLOGIA

Figura 17 - Esquema com etapas da metodologia



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS – O “ESTUDO PILOTO”

O estudo piloto foi desenvolvido no auditório do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Além de pertencer ao mesmo Departamento em que este trabalho de mestrado foi desenvolvido, o que proporciona uma melhor logística do transporte de equipamentos e maior disponibilidade de acesso à reserva do espaço, este ambiente foi escolhido por possuir características próximas aos auditórios que futuramente seriam estudados. Como exemplo dessas características tem-se a capacidade de ocupação e sua forma de uso principal ser a utilização da palavra falada. Este estudo piloto tem como objetivo a aplicação do método de avaliação acústica analítica e testar o

método experimental, bem como a metodologia e os procedimentos de medição acústica. Sua conclusão dá suporte metodológico a ser aplicado nos demais auditórios que serão estudados.

3.1.1 Levantamento arquitetônico do ambiente

Como ponto de partida para iniciar quaisquer medições acústicas de um ambiente, antes é necessário recolher dados relativos à geometria, materiais de revestimento utilizados nos auditórios e mobiliários presentes. Plantas baixas, cortes, mapas de acabamentos e pormenores representam um conjunto de dados importantes para os cálculos e análises dos dados medidos pelos equipamentos. Essas informações são necessárias também para a modelação das salas no programa computacional de simulação do comportamento acústico, quando utilizada. Vale ressaltar a importância de fotografar o ambiente para constar no relatório de estudo, seguindo recomendações da norma técnica ISO 3382:1997.

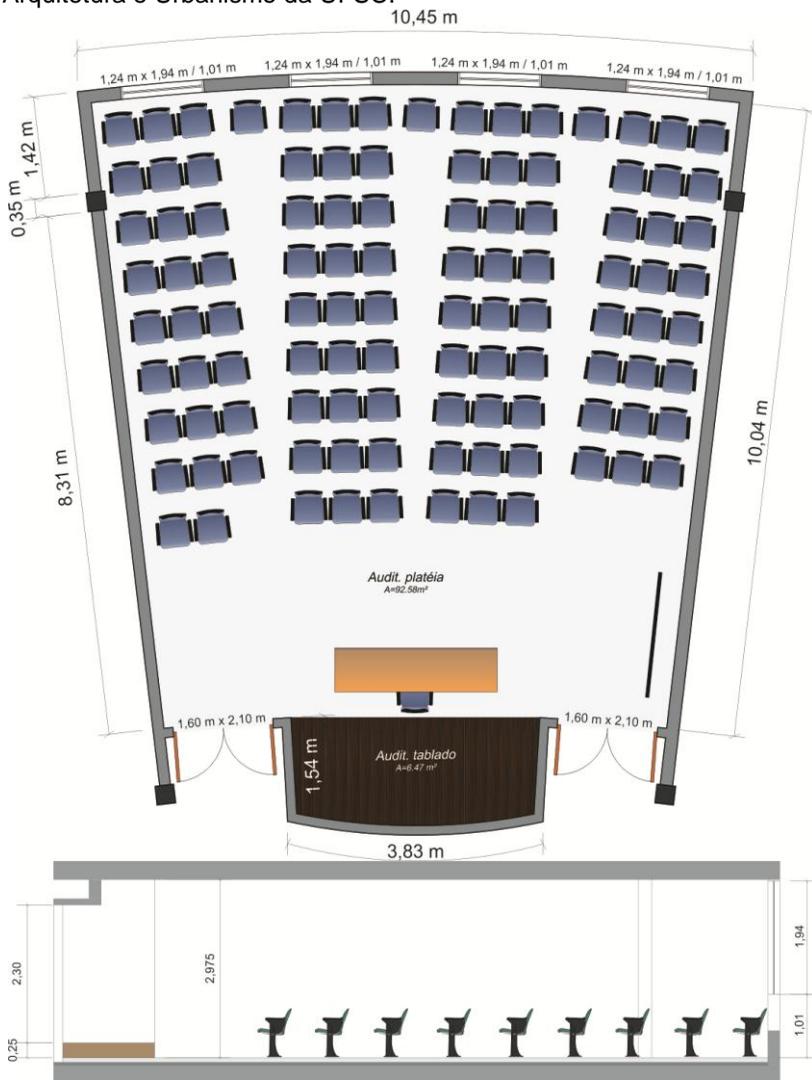
No caso do estudo piloto, o auditório tem capacidade para 105 pessoas, possui um volume total de 294,20 m³ distribuído em um formato de “leque”, conforme apresentado na Figura 18. A parede frontal, onde está localizado o palco, é constituída de duas portas de modelo “vai-e-vem” de madeira maciça com duas folhas cada uma. A parede do fundo do auditório é composta de quatro aberturas de 1,24 m x 1,94 m / 1,01 m, de modelo maximar, estrutura de alumínio e vidro simples de 6 mm. Já as duas paredes laterais são cegas (não possuem aberturas).

Quanto ao revestimento, todas as paredes são de reboco liso pintado, e o piso é de concreto alisado pintado com tinta Epóxi, com exceção do palco que possui tablado em madeira. O teto não possui forro, sendo apenas de reboco alisado. A iluminação acontece com duas luminárias de sobrepor para duas lâmpadas fluorescentes tubulares no palco, e luminárias circulares pequenas para duas lâmpadas fluorescentes compactas na área de audiência. O quadro de áreas dos materiais, e seus coeficientes de absorção sonora podem ser vistos na Tabela 5.

O mobiliário é constituído de 105 poltronas com assentos fixos e pranchetas móveis, estrutura em ferro com revestimento de poliuretano e estofamento poroso no encosto e assento; há

uma mesa de 2,60 m x 0,70 m e um quadro branco de 2,00 m x 1,20 m posicionados na frente do auditório. A Figura 19 apresenta as fotos do ambiente.

Figura 18 - Planta baixa e corte do auditório do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 5 - Quadro de áreas dos materiais e respectivos coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso concreto liso - epoxi	92,58	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Deck madeira	6,47	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Teto reboco liso	99,05	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	106,62	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Portas de madeira, fechadas	7,04	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Vidro,janela normal	4,84	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Persianas	4,84	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35

Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com tecido	104	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

*os coeficientes de absorção aqui utilizados são apresentados por Bistafa(2011).

Fonte: Elaborado pela autora.

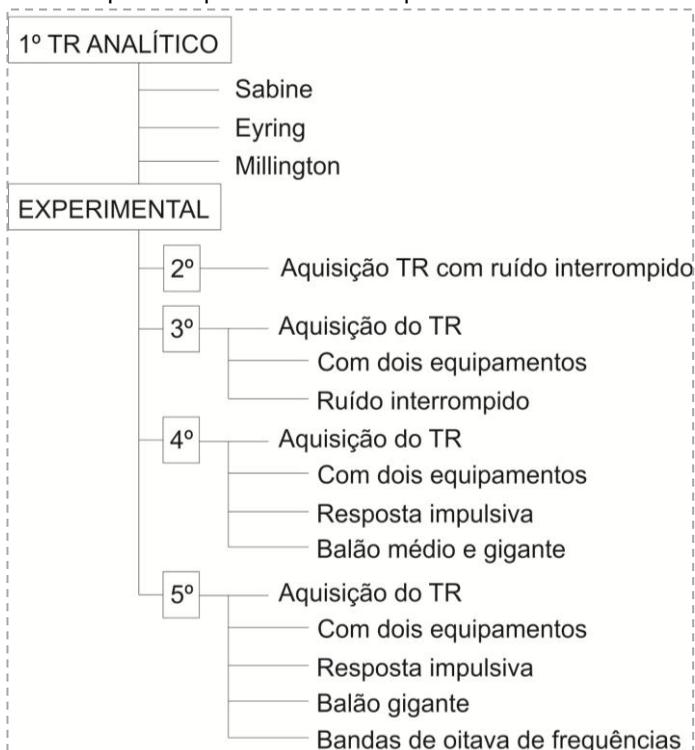
Figura 19 - (a) Vista da entrada do auditório (b) Vista do fundo do auditório.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.1.2 Descrição dos procedimentos

Figura 20 - Etapas dos procedimentos experimentais do Estudo Piloto



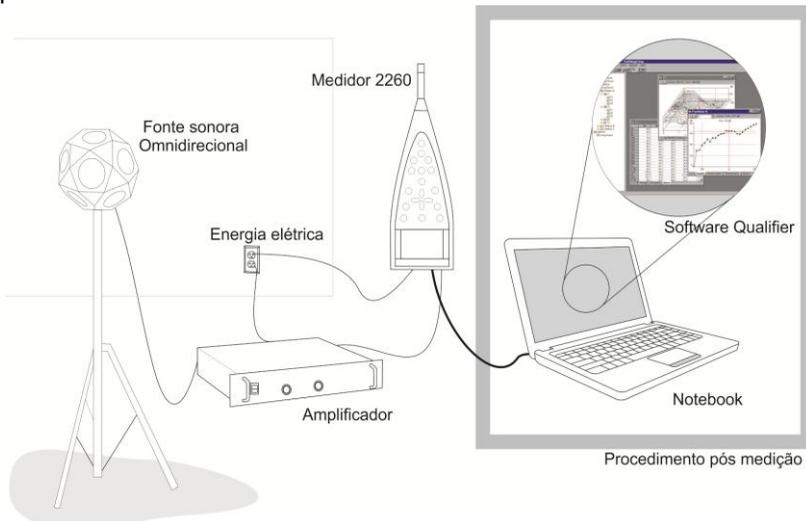
Fonte: Elaborado pela autora.

Numa fase inicial, o trabalho baseou-se na aplicação dos métodos analíticos descritos por Sabine, Eyring e Millington, como forma de melhor entender as principais variáveis que influenciam a acústica de um ambiente, principalmente na determinação do tempo de reverberação. Nesse momento, buscou-se também informação de referência sobre tempos de reverberação ideais para o ambiente nas diferentes frequências do espectro.

A segunda fase, baseada no método experimental, permitiu a avaliação dos tempos de reverberação do auditório através da resposta por ruído interrompido. Com equipamentos como o Medidor de Nível de Pressão Sonora modelo 2260 *Investigator*, a Fonte Sonora Omnidirecional Dodecaedra, o

Amplificador de Potência, e o *software Qualifier*, todos da fabricante Brüel & Kjaer, instalados conforme mostra a Figura 21. As medições foram realizadas com a fonte sonora fixa no palco, a uma altura de 1,5 m, e microfones em nove posições diferentes a uma altura de 1,20 m, com três repetições em cada posição, a uma distância mínima de 1,0 m de superfícies reflexivas (paredes, portas, colunas, entre outras).

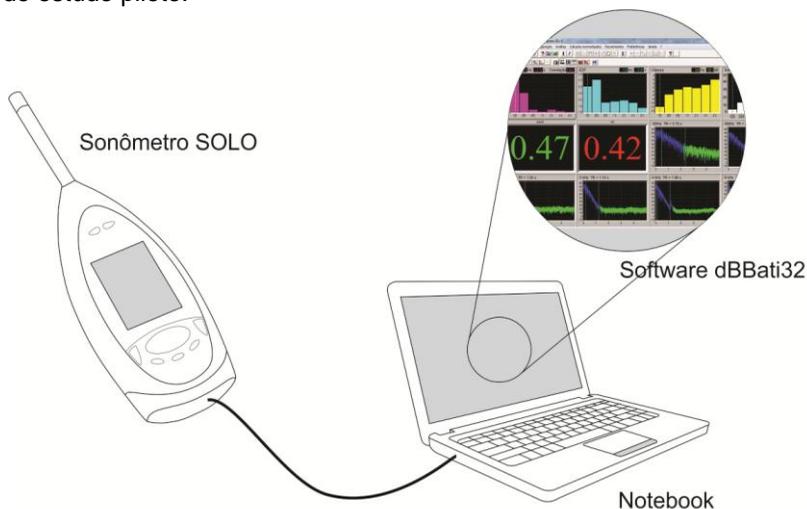
Figura 21 - Conexão dos equipamentos da segunda fase do estudo piloto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Devido à limitação do equipamento e do *software* disponível em que somente um parâmetro pode ser medido, no caso, o tempo de reverberação do ambiente, a terceira etapa do estudo piloto foi a incorporação de outro equipamento, o Sonômetro SOLO da marca 01dB mostrado na Figura 22. Junto deste foi utilizado um computador portátil que possui o software dBati32, responsável pela aquisição dos dados e pós-processamento dos mesmos, permitindo a avaliação de vários parâmetros relacionados à inteligibilidade da fala. No entanto, mesmo com todos os recursos permitidos por esse outro sistema, nesta etapa focou-se apenas nos resultados de TR, para assim poder comparar este outro equipamento.

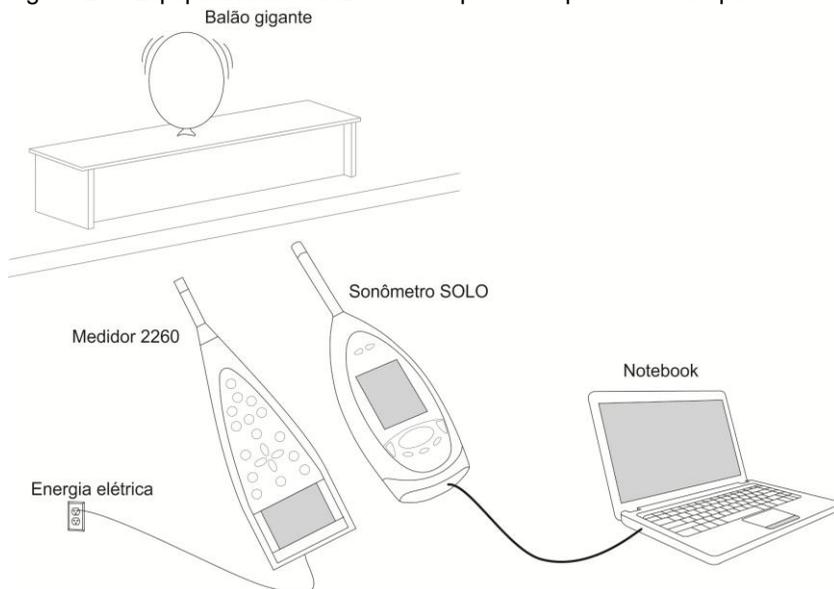
Figura 22 - Conexão dos equipamentos adicionados na terceira etapa do estudo piloto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Comparadas as respostas adquiridas pelo equipamento, e com referência à norma técnica já citada anteriormente (ISO 3382), a qual aconselha o uso do método de resposta impulsiva para obter resultados com maior precisão. Na quarta etapa, foram utilizados os dois equipamentos mencionados na etapa anterior, porém em substituição à Fonte Sonora Omnidirecional, que sem um equipamento e um software específicos não emite som de impulso, foi implantado uma técnica com balões de tamanhos médios (convencionais) e gigantes da marca ArtLatex, em que estes são estourados para geração do sinal conforme mostrado na Figura 23. A diferença de tamanho dos balões para esta etapa foi com o objetivo de poder analisar qual seria o mais apropriado para suprir os efeitos das diferentes frequências do espectro sonoro. Cabe ressaltar, que neste primeiro momento, as medições foram realizadas em bandas de 1/3 de oitava, entre 100 e 5000 Hz.

Figura 23 - Equipamentos utilizados na quarta etapa do estudo piloto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Nesta fase, concluiu-se que os balões gigantes tinham melhor efeito no espectro, conseguindo alcançar as baixas frequências devido ao tamanho (aprox. 46 cm com o balão cheio 90%, conforme é indicado como forma de uso pelo fabricante), ao volume de ar do balão, que é de aproximadamente 55 litros, e à espessura do látex. Partindo para a quinta e última etapa do estudo piloto, foram desenvolvidas medições com o equipamento da B&K (nomeado Sistema 1) e o SOLO (nomeado Sistema 2) com balões gigantes em nove pontos de recepção (três a mais do indicado por norma, que permite a execução de seis pontos de recepção para até 500 assentos). No entanto, nesta fase, a configuração de análise foi alterada para bandas de oitava, ou seja, em frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 Hz. Esta alteração ocorreu devido a considerações impostas pela norma ISO 3382.

Quanto às medições dos parâmetros, para o L_{eq} (nível de pressão sonora equivalente) e o L_{90} (ruído de fundo), as medições foram realizadas na faixa de frequências abrangidas pelas oitavas de 63 Hz a 8 kHz, em intervalos de 1 segundo, com os auditórios vazios (estavam presentes apenas três pessoas

responsáveis pelo controle dos equipamentos, situação também utilizada por Cravero (2014)) e mobiliadas, com atividades escolares ocorrendo normalmente nos espaços adjacentes. Os dados foram coletados com o medidor de nível de pressão sonora posicionado a 1,2 m do chão, 0,5 m de objetos móveis e a 1 m das paredes e objetos fixos. Para análise dos dados foi utilizado o programa Microsoft Excel.

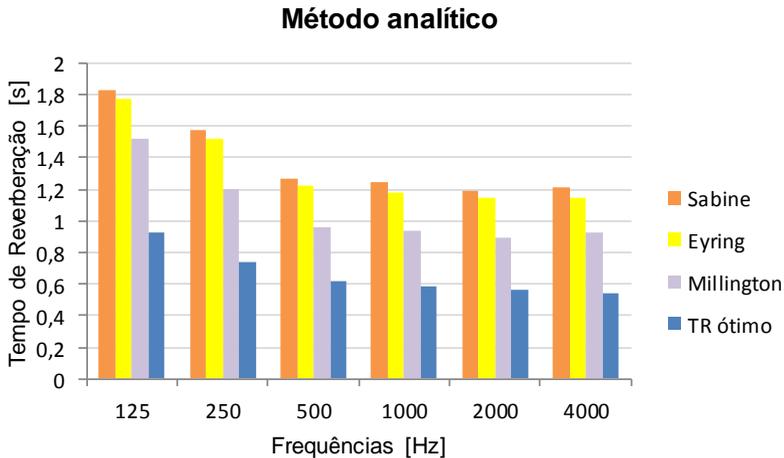
Assim como na pesquisa desenvolvida por Rabelo (2014), nesta última etapa de testes do estudo piloto, a geração do ruído impulsivo se deu a partir do estouro de balões em seis combinações diferentes de microfones, sendo respeitadas as exigências da norma ISO 3382-2, que define que o microfone deve estar a uma distância em torno de 1 m de superfícies refletoras, incluindo o chão, e também não estar próximo da posição do balão para evitar influência do som direto.

Após o trabalho em campo, todos os resultados de ambos os equipamentos e fases do estudo foram analisados, ficando definidos então, os procedimentos metodológicos das medições acústicas que foram realizadas nos demais auditórios selecionados.

3.1.3 Análise dos resultados e discussões das etapas do estudo piloto

Como resultado da primeira fase do estudo piloto (aplicação do método analítico através das fórmulas de Sabine, Eyring e Millington), tem-se a Figura 24, apresentando os tempos de reverberação alcançados no auditório do estudo piloto. As formulações para aquisição do valor de TR apresentam comportamentos semelhantes.

Figura 24 - Gráfico representando resultados da primeira etapa do estudo piloto.



Fonte: Elaborado pela autora.

Mesmo que em questão numérica esteja claro o distanciamento com os valores de TR ótimos para o local, de acordo com seu uso e volume, a interpretação dos resultados do método analítico exige atenção em função de algumas ressalvas a serem levadas em consideração. Nestes cálculos, seja de Sabine, Eyring ou Millington, o tempo de reverberação não varia entre os posicionamentos da sala, é independente da posição da fonte, não considera a forma e geometria da sala, nem temperatura e umidade do ar, e independe das situações dos materiais. Todos estes, são fatores que influenciam em grande proporção no desempenho do ambiente, como por exemplo, a influência que uma parede côncava pode causar nos raios sonoros, de maneira a focalizar o som em um determinado lugar do ambiente, conseqüentemente, vinculando o fator de posicionamento de medições na sala. Neste caso, no ponto com maiores focos de raios o TR deveria ser maior do que em uma posição distante desse local e próximo a uma parede revestida com um material poroso, em que o TR seria baixo.

Além desses fatores, algumas limitações particulares de cada fórmula devem ser conhecidas. No caso da fórmula de Sabine há uma incoerência, visto que nunca se poderá obter um tempo de reverberação nulo, mesmo que a absorção do

ambiente seja total como é o caso da câmara anecóica ou de campo aberto. Ou como o caso de Eyring que segundo Llinares, Llopis e Sancho (1996), permite a obtenção de valores de coeficientes de absorção maiores para a unidade, o que é fisicamente impossível.

Millington, com uma nova expressão, assegura a impossibilidade matemática de se obterem coeficientes de absorção maiores que a unidade, porém também apresenta um inconveniente: se o ambiente possuir qualquer superfície aberta, por menor que seja, o tempo de reverberação se anula. Na realidade, isso afetaria o tempo de reverberação do local, mas não ao ponto de torná-lo nulo. Por essas considerações, o método analítico foi aplicado neste estudo com objetivo maior de conhecer o que influencia no cálculo do tempo de reverberação de um ambiente, até mesmo para poder ser realizada uma análise aprofundada e criteriosa dos resultados encontrados para TR com os equipamentos de medição acústica.

Segundo Servín, Sánchez e Ávila (2014), há outro ponto de incerteza a ser citado: os coeficientes de absorção dos materiais, pois recentemente foi relatada a falta de reprodutibilidade dos resultados que determinam esses valores, devido, principalmente, às diferenças entre as condições de difusão entre as câmaras reverberantes dos laboratórios. Esta incerteza repercute inevitavelmente nos resultados dos projetos de condicionamento acústico.

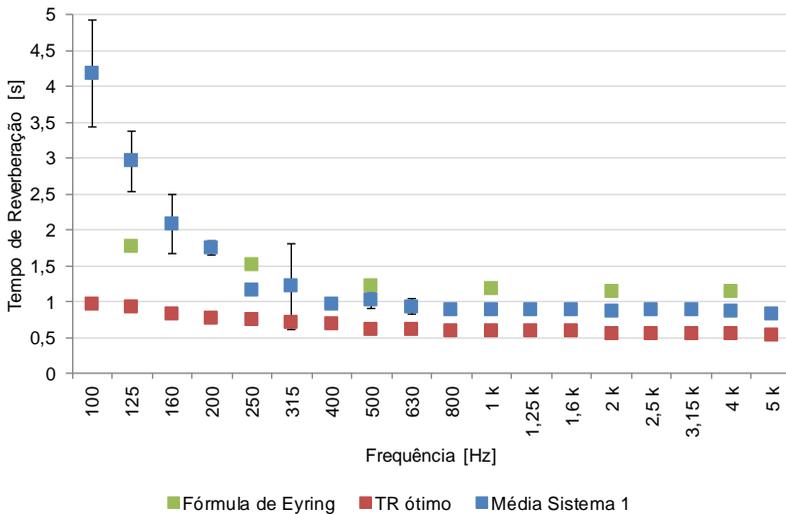
Na segunda etapa do estudo piloto, os resultados, apesar de mais distantes nas baixas frequências se comparados com os resultados analíticos, são mais confiáveis. Visto que, com os equipamentos, fatores que antes eram limitações das fórmulas, como geometria, localização no ambiente, entre outros, agora são considerados. Pode-se arriscar dizer que os equipamentos apresentam o desempenho real do ambiente. A Figura 25 mostra o tempo de reverberação médio comparado ao TR ótimo do auditório.

Como resultados da terceira etapa, em que foi adotado o Sistema 2 de medição acústica para aquisição de outros parâmetros, tem-se a Figura 26 que demonstra a comparação do comportamento dos resultados obtidos nos dois Sistemas. Nesta, fica evidente a proximidade dos valores entre eles. As diferenças nos resultados podem ser ignoradas, pois os desvios padrão e diferenças calculadas para os valores gerados pelos

equipamentos são, em média, entre 0 e 0,2, portanto, diferença baixa, com exceção da frequência de 100 Hz que foi de 0,6 entre os sistemas. De qualquer forma, aceitável para as baixas frequências, visto que são frequências com comprimentos de ondas maiores que estão vinculados aos modos normais da sala, gerando pontos nulos no ambiente e dificultando a precisão das medições.

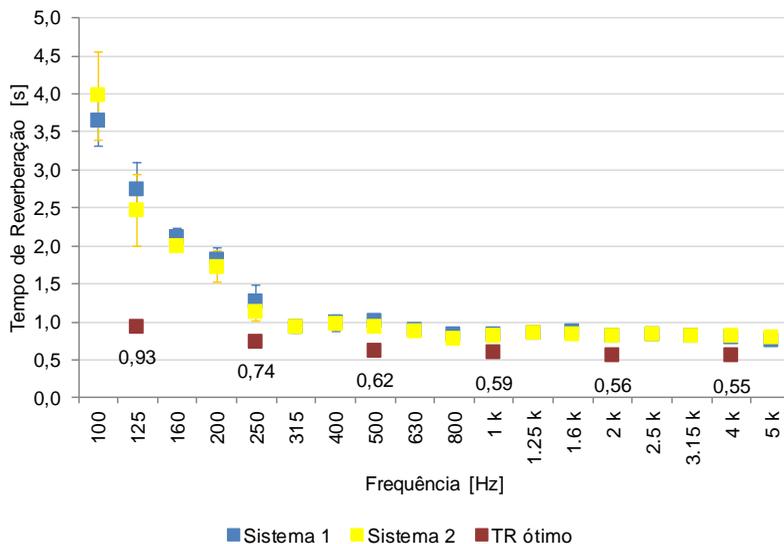
Figura 25 - Gráfico com resultados da segunda etapa do estudo piloto:

TR médio X TR ótimo X TR analítico.



Fonte: Elaborado pela autora.

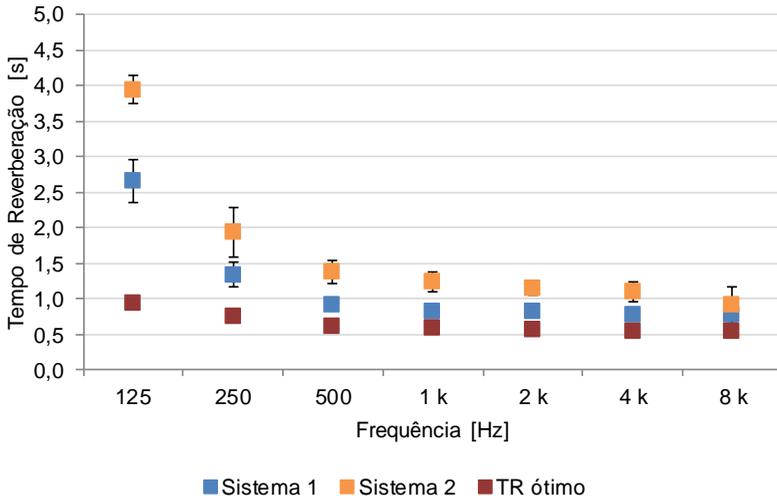
Figura 26 - Gráfico com resultados da terceira etapa do estudo piloto.



Fonte: Elaborado pela autora.

A quarta etapa do estudo piloto é marcada por resultados que permitiram a definição do uso de balões gigantes pelo fato de atingirem as baixas frequências com maior facilidade e estabilidade. A quinta etapa, apresentada na Figura 27, possui resultados um pouco mais distantes entre os sistemas. No entanto, os desvios entre eles continuam com valores baixos, com predomínio de 0 e 0,2 e, portanto, aceitáveis, além de o método aplicado ser indicado por norma para uma caracterização mais precisa do ambiente.

Figura 27 - Gráfico com resultados da quinta etapa do estudo piloto: Comparativo entre os tempos de reverberação.



Fonte: Elaborado pela autora.

Realizada a correlação e a validação dos resultados dos dois equipamentos e sistemas com os valores adquiridos de tempo de reverberação, esta quinta etapa foi escolhida para aplicação nos estudos de caso deste trabalho. Quanto aos demais parâmetros, a partir da segurança obtida com os valores de TR, os resultados para as outras variáveis também podem ser consideradas seguras.

3.2 CRITÉRIO DE SELEÇÃO DOS AUDITÓRIOS

Realizada com base principal no uso, ou seja, sua utilização principal deveria ser a fala, investigou-se então que a Universidade Federal de Santa Catarina possui, no *Campus* Trindade, uma média de um auditório por edifício, o que totalizaria dezenas de ambientes com esse fim. A UFSC, porém, possui uma separação das áreas de estudo denominadas Centros de Ensino, em quantidade de onze, que são relacionados a seguir:

- Centro de Ciências Agrárias – CCA;
- Centro de Ciências Biológicas – CCB;

- Centro de Comunicação e Expressão – CCE;
- Centro de Ciências da Saúde – CCS;
- Centro de Ciências Jurídicas – CCJ;
- Centro de Desportos – CDS;
- Centro de Ciências da Educação – CED;
- Centro de Filosofia e Ciências Humanas – CFH;
- Centro de Ciências Físicas e Matemáticas – CFM;
- Centro Socioeconômico – CSE;
- Centro Tecnológico – CTC.

O segundo critério de seleção dos estudos de caso, foi adotar a quantidade de um auditório por Centro de Ensino, o que totaliza dez ambientes, excluindo o Centro de Ciências Agrárias (CCA), por não estar localizado no *Campus* Trindade, e sim em outro bairro da cidade. O volume e a capacidade do ambiente também foram critérios norteadores para restringir ainda mais a escolha dos auditórios, visto que cada Centro de Ensino possui vários ambientes com essa finalidade. Dentre os dez Centros que poderiam ser escolhidos, o CCB possui o auditório interdito, o CFM não possui auditório e o CFH, requeria uma burocracia de documentação e aceites para sua reserva, situação limitada pelo prazo para execução das medições. Ao final obteve-se sete auditórios a serem avaliados.

Em contato realizado com o Centro de Eventos da Universidade, foi recebida uma listagem dos principais auditórios utilizados na UFSC. Percebendo-se então que o Centro Tecnológico possui dois auditórios muito utilizados. Em função disto foi adicionado mais um auditório do CTC, totalizando oito ambientes para análise:

- Auditório do Centro de Comunicação e Expressão – CCE;
- Auditório do Centro de Ciências da Saúde – CCS;
- Auditório do Centro de Ciências Jurídicas – CCJ;
- Auditório do Centro de Desportos – CDS;
- Auditório do Centro de Ciências da Educação – CED;
- Auditório do Centro Socioeconômico – CSE;
- Auditório do Centro Tecnológico – CTC – Engenharia de Produção;
- Auditório do Centro Tecnológico – CTC – Engenharia Elétrica.

3.3 DESCRIÇÃO DOS AMBIENTES DE ESTUDO

3.3.1 Auditório do Centro de Comunicação e Expressão – CCE

Dimensionado para possibilitar a presença de 120 pessoas, este auditório, nomeado Henrique da Silva Fontes, possui volume aproximado de 653,04 m³. Está localizado em uma área central do bloco edificado com espaços de circulação e convivência/leitura em seu entorno imediato, o que confere em alguns momentos ruídos que interferem no ambiente estudado. Por critério de segurança, ou para evacuação dos ocupantes do auditório, o ambiente possui duas portas principais na parede oposta ao palco, portanto, fundos do ambiente, ambas de madeira, compostas de uma folha, e mais duas portas secundárias implantadas uma em cada parede lateral, localizadas no eixo de circulação existente entre palco e audiência. Estas também de madeira, porém, com duas folhas de abertura cada.

Tabela 6 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso cerâmico	202,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
Teto reboco liso	202,1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	177,7	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Portas de madeira, fechadas	12,4	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Vidro, janela normal	1,1	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Divisória leve	11,6	0,58	0,22	0,07	0,04	0,03	0,07
Cortina pesada	23,0	0,14	0,35	0,55	0,72	0,7	0,65
Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	2	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com tecido	126	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

*Fonte LogAcustica Ltda. Disponível em:
<http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>

Fonte: Elaborado pela autora.

O palco está no nível de acesso do auditório, então considerado nível zero, porém está em desnível se comparado com a área de audiência, que pertence ao nível -0,38 m na primeira fileira, seguindo de forma escalonada até o fundo do ambiente. O revestimento de piso, tanto do palco, quanto da plateia é de cerâmica; as paredes e o teto são de alvenaria convencional rebocada e pintada. Todos os revestimentos são mostrados na Tabela 6 e na Figura 28. O palco possui cortina pesada, bancada, púlpito, equipamentos de áudio e vídeo, além de uma sala posicionada na lateral, criada com divisórias leves. A plateia está disposta em cadeiras com revestimento em tecido poroso, estrutura de poliuretano e assento fixo. Aos fundos do ambiente há uma pequena esquadria de janela dimensionada em 1,10 m x 1,10 m / 1,50 m, que permite visualização de uma antecâmara de controle dos equipamentos para o interior do ambiente. Esta esquadria é de madeira com sistema de correr em duas folhas, cada uma com vidro simples de 6 mm de espessura.

Figura 28 - (a) Vista da audiência. (b) Vista do palco do auditório.

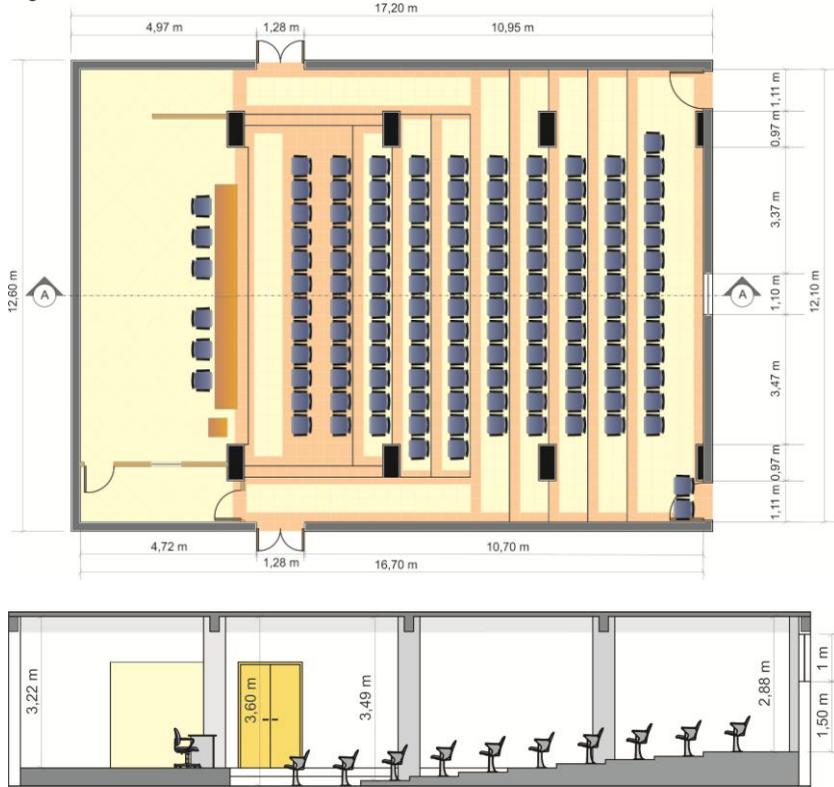


Fonte: Arquivo pessoal.

Quanto às instalações, o condicionamento do ar do ambiente é feito por quatro equipamentos do tipo Split e a iluminação é realizada através de luminárias com sistema refletivo para duas lâmpadas fluorescentes tubulares cada. Estas são suspensas por um sistema metálico, a fim de manter a iluminação sem influência de sombreamento que as vigas dispostas transversalmente e maneira exposta no teto do

ambiente poderiam causar. O total de luminárias é de 24 unidades.

Figura 29 - Planta Baixa e corte do auditório do CCE.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.2 Auditório do Centro de Ciências da Saúde – CCS

Com um grande diferencial em relação aos demais auditórios, o ambiente possui um grau de escalonamento da área de audiência muito acentuada. Possui capacidade para 140 pessoas e volume de aproximadamente 910,27 m³. Seu nível zero é na área de acesso ao ambiente, deslocando-se até um nível de 5,075 m, cuja diferença é dividida em doze patamares de audiência.

Seu entorno imediato é caracterizado por áreas de circulação internas e externas nos quatro lados. Porém, na

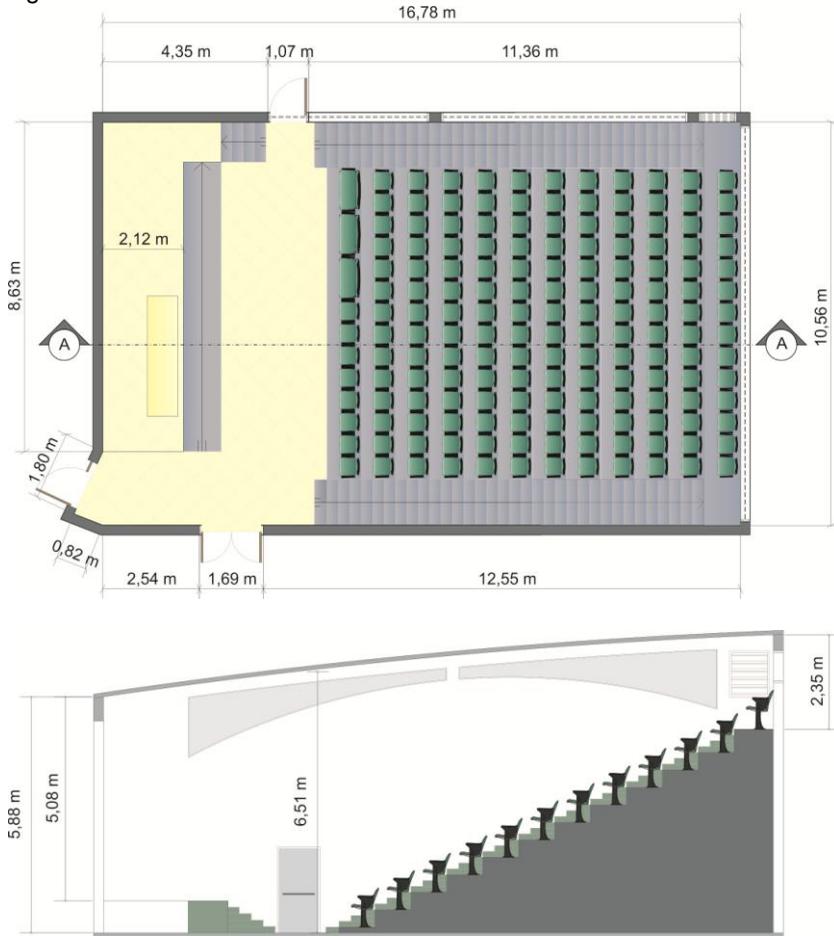
parede onde está localizado o palco, antes de ter acesso ao lado externo, há uma sala de controle dos sistemas de iluminação e condicionamento de ar. Estes funcionam, respectivamente, com luminárias de sobrepor para duas lâmpadas fluorescentes tubulares com refletores de alumínio, e ar condicionado central. Quanto às instalações do auditório, o mobiliário é composto de uma bancada de madeira no palco e poltronas com estofamento revestido em couro no assento e encosto, estrutura de poliuretano com prancheta e assento móveis, que podem ser conferidas nas Figura 30.

Figura 30 - (a) Vista da área da audiência. (b) Vista do palco do auditório.



Fonte: Arquivo pessoal.

Figura 31 - Planta Baixa e corte do auditório do CCS.



Fonte: Elaborado pela autora.

A respeito das características físicas do espaço, a Tabela 7 apresenta os materiais com suas respectivas áreas no ambiente e coeficientes de absorção sonora.

Tabela 7 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso cerâmico	53,4	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Piso carpete	124,5	0,05	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40
Teto reboco liso	177,9	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	208,7	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Vidro, janela normal	17,5	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Portas de madeira, fechadas	8,9	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10

Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	2	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com couro**	140	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

*Fonte: LogAcustica Ltda. Disponível em: <http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>

**Fonte: (MARCO, 1982)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.3 Auditório do Centro de Ciências Jurídicas – CCJ

Com um *layout* e características semelhantes a uma sala de aula, o auditório do Centro de Ciências Jurídicas não possui desníveis ao longo da área de audiência, apenas a diferença de altura do palco, que é na medida de 0,23 m. Todo o piso, incluindo o palco, é revestido com carpete e este também está presente nas paredes do palco e na parede ao fundo da plateia, como pode ser visto na Figura 33. Os materiais de revestimento podem ser identificados com as áreas na tabela 8. As áreas de janelas e portas também são identificadas e seus posicionamentos podem ser conferidos na planta baixa do ambiente, na Figura 32.

Com volume de 368,14 m³, este ambiente pode comportar 90 pessoas. As poltronas são com estofamento de tecido poroso, estrutura de poliuretano e prancheta de madeira laminada móvel. Quanto às instalações, grande parte da iluminação acontece com luminárias de sobrepor para duas lâmpadas fluorescentes tubulares cada, com refletores de alumínio, e outra parte (corredor de circulação) acontece com luminárias circulares,

também de sobrepor, porém para lâmpadas fluorescentes compactas. O condicionamento de ar é feito através de aparelhos do tipo Split, em um total de três unidades. Há no auditório, também, sistema de áudio e vídeo, com caixas de som distribuídas ao longo do ambiente.

Figura 32 - Planta Baixa e corte do auditório do CCJ.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 8 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso carpete	117,6	0,03	0,09	0,25	0,31	0,33	0,44
Teto reboco liso	117,6	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	72,6	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Vidro,janela normal	20,8	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Portas de madeira, fechadas	8,0	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Parede de carpete	52,5	0,03	0,09	0,25	0,31	0,33	0,44
Cortina leve	40,6	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35

Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	2	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com tecido	94	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 33 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da área de audiência.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.4 Auditório do Centro de Desportos – CDS

Posicionado dentro do edifício de forma que está construído ao lado de uma sala de danças, separados pela parede ao fundo da área de audiência, e com os demais lados do entorno sendo ocupados por circulação, estacionamento de veículos e quadra de esportes, o auditório do Centro de Desportos possui capacidade para abrigar 105 pessoas. É escalonado de modo que o nível zero ocorre onde acontece o acesso ao ambiente, ou seja, no fundo da plateia, e a diferença é com um total de -1,19 m em direção ao palco. Seu volume é de aproximadamente 524,25 m³.

A técnica construtiva adotada é alvenaria convencional, e os revestimentos, aberturas e mobiliário podem ser conferidos na Tabela 9 com auxílio das Figura 34 e Figura 35 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da audiência do auditório. Quanto aos

equipamentos existentes no ambiente, há o sistema de áudio e vídeo, portanto há caixas de som distribuídas pelo auditório. A iluminação é realizada com eletrocalhas e luminárias de sobrepor para duas lâmpadas fluorescentes tubulares cada, com total de vinte e oito unidades. O sistema de condicionamento térmico é realizado por meio de três equipamentos de ar condicionado tipo *Split*.

Tabela 9 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

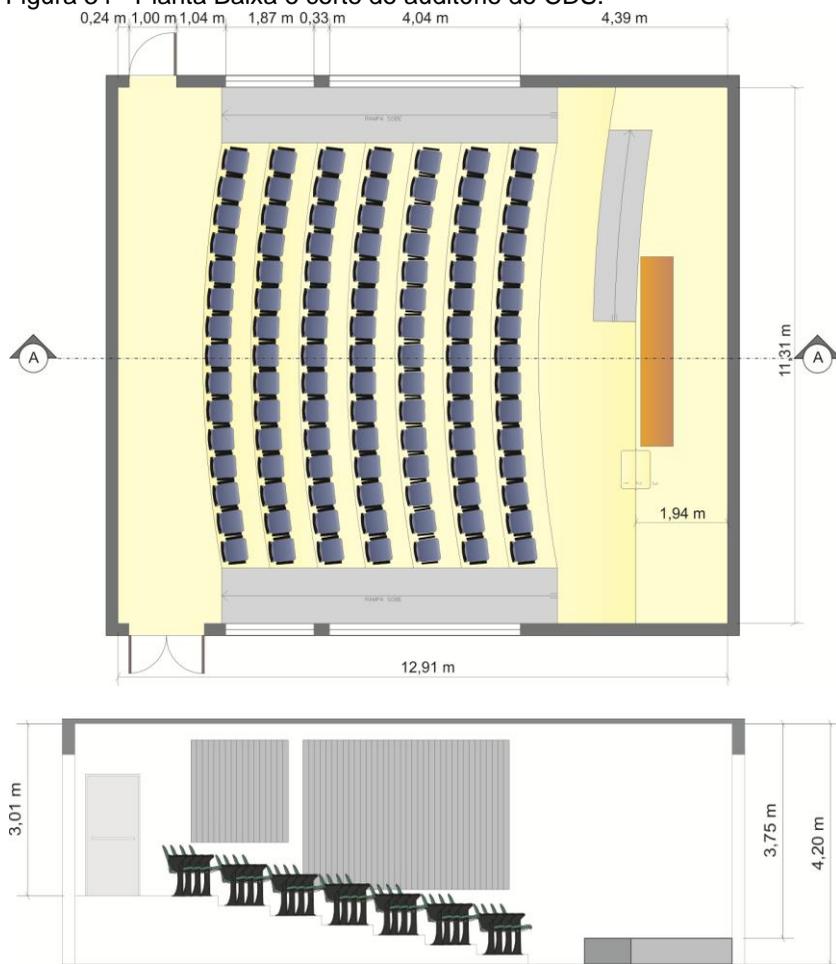
Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso cerâmico	123,8	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Piso borracha**	20,3	0,04	0,04	0,08	0,12	0,03	0,10
Teto reboco liso	144,1	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	125,4	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Vidro,janela normal	24,7	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Portas de madeira, fechadas	5,8	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Persiana	24,7	0,03	0,04	0,11	0,17	0,24	0,35
Cortina blackout	24,7	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	2,0	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com tecido	110	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

*Fonte: LogAcustica Ltda. Disponível em: <http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>

**Fonte: (ABNT, 1992)

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 34 - Planta Baixa e corte do auditório do CDS.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 35 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da audiência do auditório.



Fonte: Arquivo pessoal.

3.3.5 Auditório do Centro de Ciências da Educação – CED

Dentre todos os auditórios selecionados, este talvez seja o mais antigo de todos. Sua localização na edificação ocorre com a parede de acesso principal do auditório fazendo limite com a área de refeição e cantina do Centro de Ciências da Educação. Três de suas paredes fazem limite com a área de circulação e o estacionamento de veículos. Vale comentar que em frente à porta principal do ambiente há uma divisória leve de vidro com estrutura de madeira, criando uma espécie de hall de acesso. A parede lateral, onde estão localizadas as janelas; possui brises verticais metálicos que auxiliam, mesmo que de forma tímida, na redução do ruído externo no ambiente.

Figura 36 - (a) Vista da audiência. (b) Vista do palco do auditório.

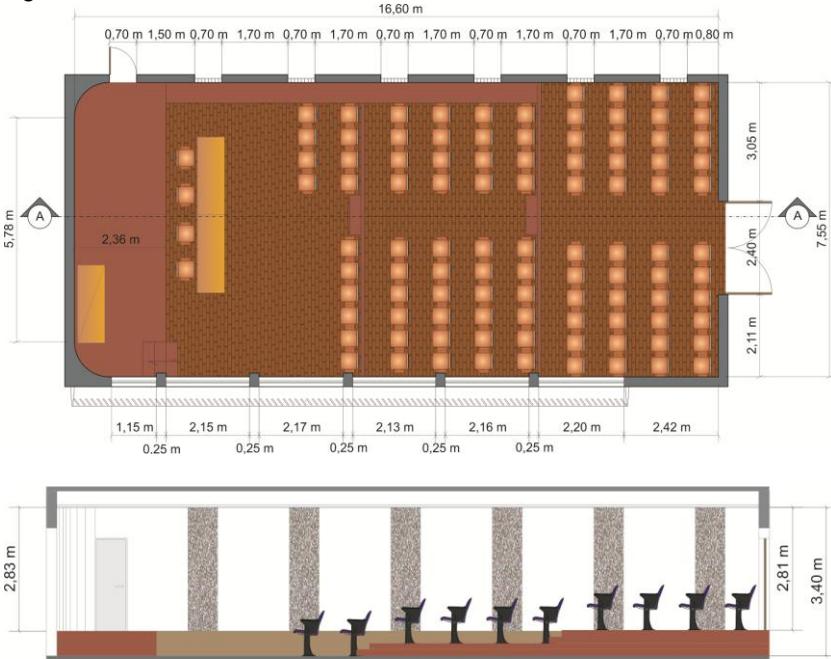


Fonte: Arquivo pessoal.

Com capacidade para 98 pessoas, o escalonamento da audiência é dividido em apenas três níveis, com diferenças de 0,30 m entre eles. Construído em alvenaria convencional, as paredes são rebocadas e pintadas, sendo o piso revestido com tacos de madeira. O forro foi construído com placas modulares absorventes. As janelas são metálicas de correr com vidro simples. Suas dimensões de comprimento variam conforme o vão entre pilares, a altura é de 1,62 m e peitoril de 1,79 m. A porta principal apresenta duas folhas de madeira com dimensões de 2,39 m x 2,10 m, permanecendo sempre com uma das folhas fechadas. Todas as aberturas possuem cortinas. Nas janelas, há dois tipos: *blackout* e tecido leve, e na porta de acesso, apenas cortina de tecido pesado. O palco é de madeira com altura de 0,57 m. O mobiliário é composto por mesas e armários de madeira. As poltronas tem estrutura metálica com revestimento de couro e prancheta fixa de madeira.

O sistema de iluminação é constituído por luminárias expostas para uma lâmpada fluorescente tubular cada, totalizando trinta e cinco luminárias. O condicionamento térmico é através de três aparelhos de condicionamento de ar do tipo Split.

Figura 37 - Planta Baixa e corte do auditório do CED.



Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 10 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso de tacos de madeira	103,4	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Palco madeira c/espaco de ar	21,9	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Placas de gesso	125,3	0,06	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Parede alvenaria rebocada	100,3	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Cortina blackout	25,8	0,14	0,35	0,55	0,72	0,70	0,65
Portas de madeira, fechadas	6,5	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Gesso acartonado	7,9	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03

Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Armário madeira*	1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com tecido em couro**	98	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

*Fonte: LogAcustica Ltda. Disponível em:

<http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>

**Fonte: (MARCO, 1982)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.6 Auditório do Centro Socioeconômico – CSE

Com uma capacidade para 120 pessoas, este auditório possui um volume de aproximadamente 417 m³. Possui um palco de alvenaria, cujo volume foi subtraído do valor total do ambiente por se tratar de um volume maciço. A área de audiência é escalonada com desníveis de aproximadamente 0,12 m em cada degrau. A Figura 38 mostram o palco e a área de audiência, respectivamente.

Figura 38 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da audiência.

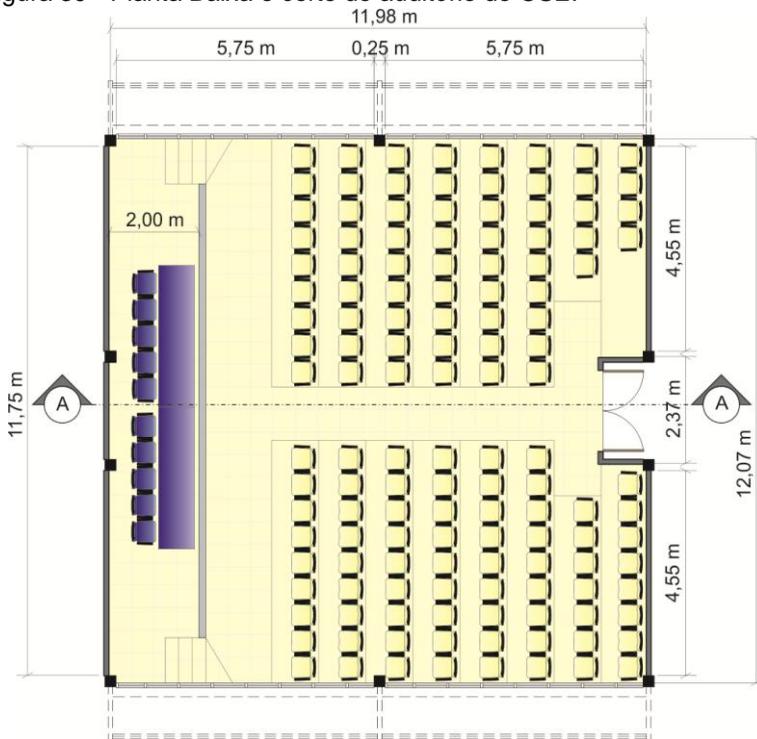


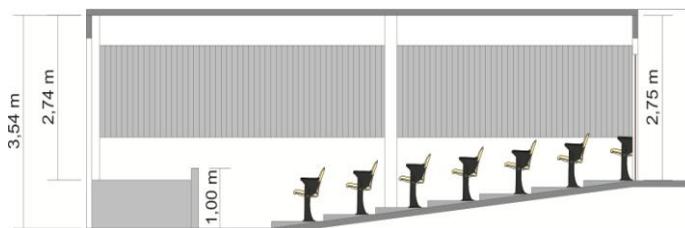
Fonte: Arquivo pessoal.

As paredes são de alvenaria convencional e o teto é laje de concreto maciço. Ambos são revestidos de reboco liso pintado. As luminárias totalizam dezenove unidades, sendo o modelo de canaletas compostas por duas lâmpadas

fluorescentes tubulares cada. As aberturas do auditório foram projetadas como modelo em “fita”, ou seja, as janelas ocupam todo o comprimento das duas paredes laterais do ambiente, tendo uma altura total de 1,40 m bipartida em dois vãos com fechamento tipo maxim-ar. Com relação a portas, o ambiente possui apenas uma porta de acesso, de modelo batente composta de duas folhas de madeira maciça. As janelas apresentam persianas verticais nas janelas com altura de 1,70 m, que no momento da medição acústica estavam fechadas. O ambiente possui sistema áudio visual distribuído pela lateral da audiência.

Figura 39 - Planta Baixa e corte do auditório do CSE.





Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 11 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso cerâmico	141,8	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Teto reboco liso	141,8	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	93,9	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Vidro, janela normal	29,4	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Portas de madeira, fechadas	4,0	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	3,8	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, em couro**	120	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Cadeira estofada, chata, com tecido	10	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

*Fonte: LogAcustica Ltda. Disponível em:

<http://logacustica.com/coeficientes-de-absorcao-sonora-sound-absorption-coefficients/>

**Fonte: (MARCO, 1982)

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.7 Auditório do Centro Tecnológico – CTC – Engenharia de Produção

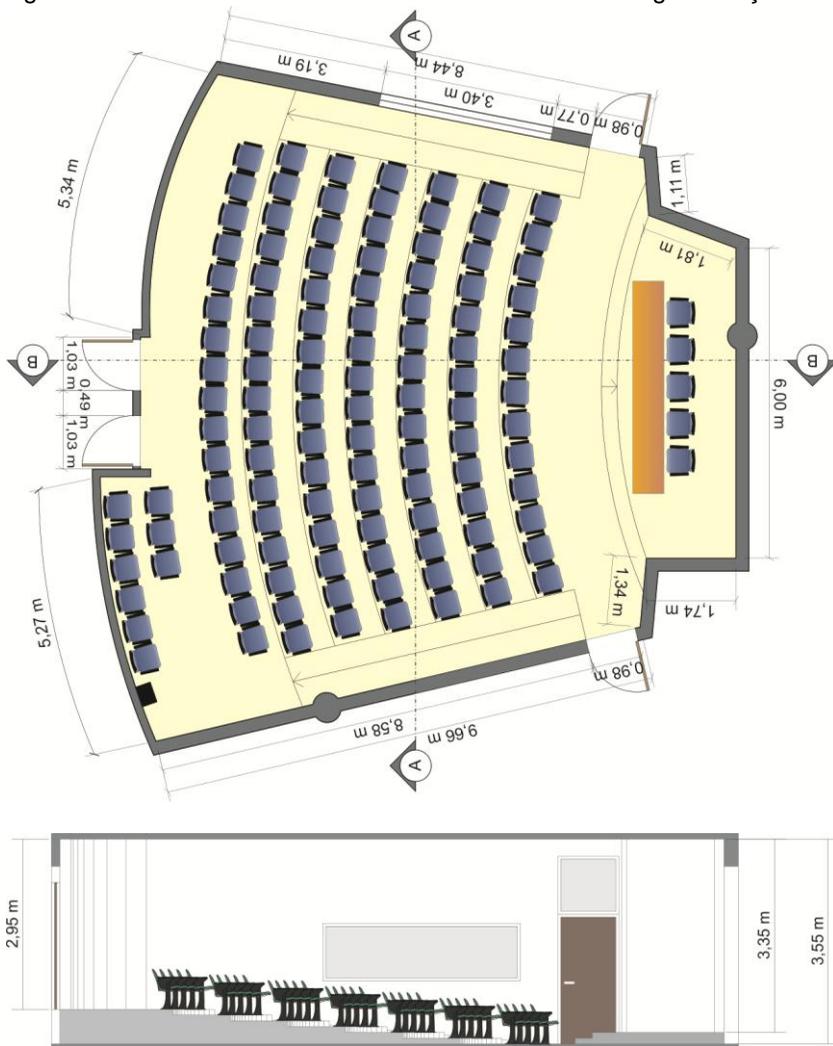
Com um formato atípico com relação aos demais ambientes selecionados, o auditório do Departamento de Engenharia de Produção possui uma composição do espaço físico em que a parede de acesso, localizada ao fundo da plateia, possui geometria curva (côncava). As paredes laterais não são paralelas e o palco possui localização própria, ou seja, está

recuado em relação à que seria a parede limitante do ambiente (Figura 40).

Projetado para abrigar também a atividade de ensino à distância (EAD), este ambiente possui 383,00 m³ de volume, com capacidade de aproximadamente 110 pessoas. O ambiente possui sistema de áudio e vídeo, bancada de madeira laminada no palco, e sala de controle do som, com janela de vidro 6 mm voltada para o interior do auditório. Na mesma parede há uma porta simples de uma folha de madeira, e acima desta uma área de 1,00 m² de vidro com a mesma tipologia da abertura já citada. Na parede oposta há uma porta simples também e a partir da altura de 2,20 m, acompanhando grande parte da extensão da parede, acontecem aberturas do tipo maxim-ar com características comuns às outras, ou seja, esquadria de alumínio e vidro simples.

O piso possui revestimento cerâmico no palco e na área de audiência. As paredes são de alvenaria convencional com reboco liso e pintado, assim como a laje do teto, que não possui forro. Quanto ao mobiliário, as poltronas, que totalizam 110 unidades, são estofadas com material poroso no encosto e assento fixo, sua estrutura é de poliuretano, e possui prancheta móvel de madeira revestida com BP liso.

Figura 40 - Planta Baixa e corte do auditório do CTC – Eng. Produção.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 41 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da área de audiência.



Fonte: Arquivo pessoal.

Tabela 12 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso cerâmico	119,4	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Teto reboco liso	119,4	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	132,4	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Portas de madeira, fechadas	9,1	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Vidro, janela normal	10,5	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	1	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, com tecido	115	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.8 Auditório do Centro Tecnológico – CTC – Engenharia Elétrica

Bastante conhecido no meio acadêmico como “Teixeirão”, o auditório do Departamento de Engenharia Elétrica, nomeado Prof^o Luiz Antunes Teixeira, comporta 120 pessoas e está localizado em área ruidosa, por estar à margem da Rua Deputado Antônio Edu Vieira, que possui tráfego intenso de

veículos, além de estar rodeado nos outros três lados de circulação e pátio interno da edificação.

Com um volume de aproximadamente 394,19 m³, o auditório possui desníveis na área de audiência, cada um com alturas diferentes. O palco tem diferença de 0,35 m em relação ao nível zero, construído em alvenaria. As paredes, também de alvenaria convencional, são rebocadas e pintadas. A laje é de concreto, também rebocado e pintado, e o piso é revestido com cerâmica. As janelas estão todas localizadas na parede voltada para a Rua Deputado Antônio Edu Vieira, são de alumínio com vidro simples de 6 mm e película cor cinza, folhas de correr com caixilho superior com abertura basculante, e não possuem cortinas. As portas são de madeira maciça com duas folhas batentes e dimensões de 1,78 m x 2,20 m. Uma delas está localizada na parede ao fundo do auditório onde ocorre o acesso principal e outra na parede lateral do palco.

Tabela 13 - Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora.

Quadro de materiais e coeficientes de absorção sonora							
Material	Área (m ²)	Coeficiente de absorção					
		125	250	500	1000	2000	4000
Piso cerâmico	134,6	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
Teto reboco liso	134,6	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Parede alvenaria rebocada	101,5	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Portas de madeira, fechadas	7,8	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10
Vidro, janela normal	21,4	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Quadro de materiais e absorção sonora							
Item	Quant. (un.)	Absorção sonora (m ²)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Mesa madeira*	2	0,40	0,30	0,20	0,17	0,15	0,10
Cadeira estofada, chata, em couro**	120	0,09	0,13	0,15	0,15	0,11	0,07
Cadeira estofada, chata, com tecido	6	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
Pessoa em pé	2	0,19	0,33	0,44	0,42	0,46	0,37

Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 42 - (a) Vista do palco do auditório (b) Vista da área de audiência do auditório.



Fonte: Arquivo pessoal.

As poltronas são de ferro com estofamento em couro, assento fixo e sem prancheta. No palco está presente uma bancada de madeira laminada e mais seis cadeiras, estas, porém, com estofamento de tecido poroso. O sistema de iluminação é com luminárias de sobrepor para lâmpadas fluorescentes compactas em um total de vinte e quatro unidades. O sistema de condicionamento de ar é implantado com dois aparelhos do tipo Split. O auditório é dotado também de equipamentos de áudio e vídeo.

Tabela 14 – Quadro comparativo das características dos auditórios selecionados.

Sala	Comp. [m]	Larg. [m]	Pé direito [m]	Área [m ²]	Volume [m ³]	Lotação [unidades]	Imagem
CCE	16,7	12,1	3,23	202,1	653,04	120	
CCS	16,78	10,56	-	177,90	910,27	140	
CCJ	11,87	8,4	3,14	117,6	368,14	90	
CDS	12,91	11,31	-	144,01	524,25	105	
CED	16,6	7,55	3,07	125,33	384,52	98	
CSE	11,98	12,07	-	141,80	417,00	120	
CTC EP	-	-	-	119,40	383,00	110	
CTC EE	14,15	9,51	-	134,60	394,19	120	

Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA

As medições acústicas avaliam a realidade dos locais e dos ambientes sonoros, identificando critérios relacionados ao desempenho da inteligibilidade da fala, principal utilização dos auditórios.

Baseado na norma ISO 3382-1: 2009 *Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance space*, a qual abrange questões como equipamentos que devem ser utilizados, faixa de frequências a serem usadas e critérios de medições de parâmetros acústicos de salas, esta etapa de medições *in loco* foi realizada com o método da resposta impulsiva. Este procedimento possibilita a obtenção dos parâmetros acústicos utilizados para determinação da qualidade acústica dos oito auditórios selecionados, tais como o tempo de reverberação (TR), o tempo de decaimento inicial (EDT), a clareza (C_{80}), definição (D_{50}), índice de transmissão da fala (STI).

3.4.1 Método experimental

3.4.1.1 Equipamentos e sistema de medições

O método adotado para obtenção da resposta impulsiva em cada auditório selecionado foi o estouro de balões gigantes da marca ArtLatex, conforme descrito no item 3.1.2, referente aos resultados obtidos nos testes do estudo piloto.

Na etapa de obtenção da resposta do sinal foram utilizados os dois equipamentos aplicados no estudo piloto, que são: o Medidor de Nível de Pressão Sonora da fabricante *Brüel & Kjaer* modelo 2260 *Investigator*, disponibilizado pelo Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC, e o sonômetro SOLO, disponibilizado pelo Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. O primeiro medidor mede o decaimento de energia sonora pelo método impulsivo, permitindo a obtenção das médias do tempo de reverberação, enquanto o segundo mede a resposta impulsiva da sala, gerando todos os parâmetros acústicos já citados. A opção por manter a utilização dos dois equipamentos simultaneamente se deu com a intenção de poder realizar um comparativo dos tempos de reverberação e

assim comprovar a veracidade dos resultados dos outros parâmetros medidos pelo medidor SOLO.

O medidor da *B&K* foi configurado conforme a norma técnica ISO 3382:2009 e após as medições foi conectado ao programa computacional *Qualifier* da mesma fabricante, para transferência e pós-processamento dos dados. Enquanto esse sistema possui vínculo com o *software* apenas depois da realização da medição *in loco*, o sistema SOLO possui essa conexão de forma simultânea. Para isso, foi utilizado, além do medidor, o computador portátil que possui o *software* dBati32, o qual recebe toda a configuração do trabalho a ser realizado e processa os resultados das medições.

3.4.1.2 Posicionamento dos equipamentos e configurações das medições

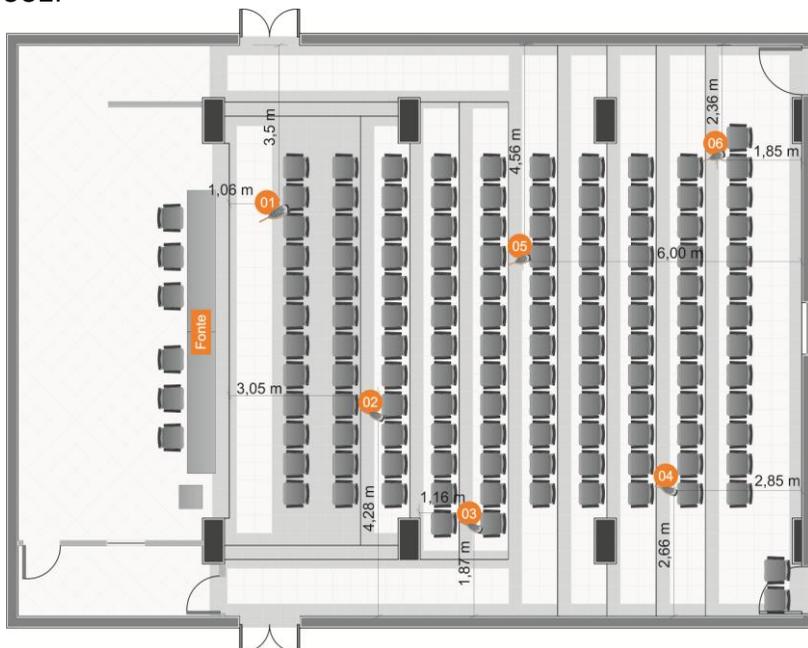
Conhecendo o volume do ambiente em que é realizada a medição e baseado na norma técnica ISO 3382:2009, utilizaram-se seis posições de microfones e, em todos os casos, apenas uma posição de fonte, a qual foi localizada no centro do palco a 1,5 m do chão. Os microfones foram posicionados a 1,2 m de altura e entre as poltronas, para representar a possível localização do ouvinte. Para cada ponto de receptor foram registradas três leituras, de acordo com recomendações da norma ISO 3382(2009) e procedimentos adotados no estudo piloto. Com o medidor SOLO, os níveis de pressão sonora do ruído de fundo foram obtidos em cada ponto de posicionamento dos microfones.

Os materiais e objetos encontrados no interior da sala não foram retirados e as cortinas ou persianas, quando haviam, foram fechadas para a realização do experimento. Todas as medições foram realizadas com o ambiente desocupado, para que pudessem ser adquiridas características de cada auditório, estando presente apenas três pessoas responsáveis pelo comando dos equipamentos.

Como modo de evitar interferência do ruído de fundo na geração de sinal para ativação dos equipamentos, o nível mínimo de disparo para acionamento da medição foi configurado para 80 dB. De modo geral, os dois aparelhos foram configurados para adquirir respostas em frequências, considerando bandas de oitava de frequências centrais de 125 até 8.000 Hz, para todos

os parâmetros. A Figura 44 mostra a posição da fonte e dos receptores no auditório do CCE. As posições dos aparelhos nos outros auditórios podem ser observadas no Apêndice A.

Figura 44 – Planta baixa com os pontos de medições do auditório do CCE.



Fonte: Elaborado pela autora.

A análise dos resultados encontrados para cada parâmetro acústico de cada ambiente estudado é feita com base teórica retirada de bibliografias. Estas apresentam faixas de valores ideais a serem considerados para cada variável, a fim de que seja estabelecido se o ambiente está em conforto ou é apropriado para o uso a que se destina, no caso geral dos locais trabalhados, uso da palavra falada.

O TR é avaliado por meio dos gráficos apresentados nas Figura 10 e Figura 11, conforme a NBR 12179 e Bistafa (2011). O Tempo de Decaimento Inicial (EDT), como já exposto no decorrer do trabalho, está vinculado ao TR. Desta forma, sua análise é feita pelo comparativo entre eles, o que permitirá a avaliação da sensação de reverberação do ambiente, verificando se é maior ou menor que os resultados físicos obtidos na sala.

Para o C_{80} , foram considerados como aceitáveis os valores encontrados na norma ISO 3382-1 / 2009, ou seja, entre -5 dB e 5 dB. Para o parâmetro de Definição (D_{50}) não há uma faixa de valor definido; quanto mais próximo de 1, melhor é o resultado e sua representatividade dentro do ambiente. Porém, adotou-se o mínimo aceitável adequado para a fala de 0,65%, valor retirado da literatura.

O STI foi estabelecido conforme a norma IEC 60268-16, como mostra a Tabela 4.

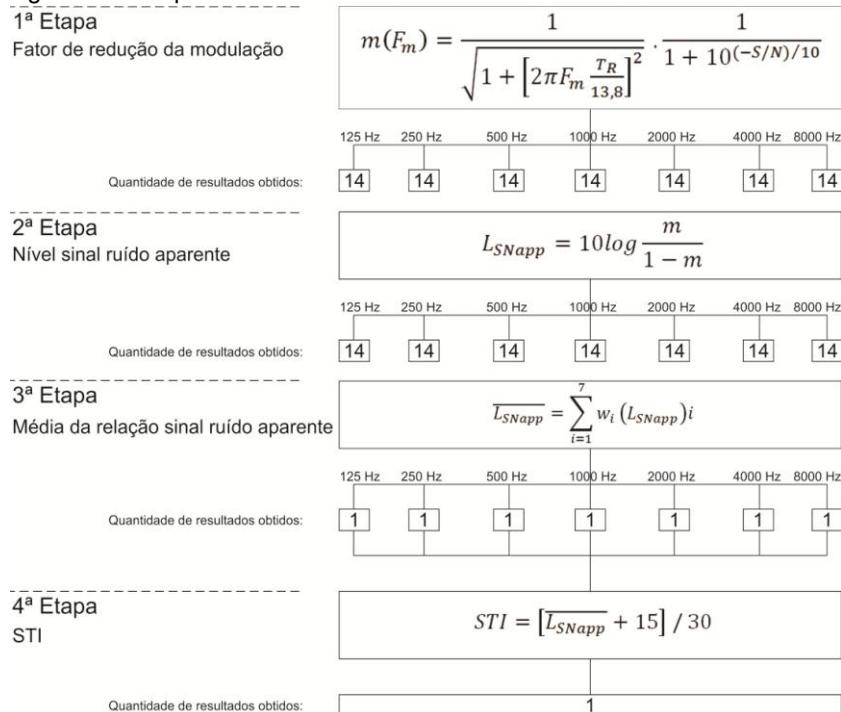
3.4.2 Método analítico

Este método consiste no cálculo de um parâmetro acústico específico, no caso, o STI que é o foco principal deste trabalho. Os ensejos que motivaram a utilização deste método foram:

- A necessidade de se terem ferramentas possíveis de serem utilizadas quando o acesso a determinados equipamentos e *softwares* são limitados, de modo que a análise de um espaço fechado possa ser da realizado do mesmo modo. Para isso, a comparação entre os resultados dos cálculos com os resultados do equipamento foi feita, a fim de comprovar a veracidade de dados que o primeiro fornece;
- A necessidade de se conhecerem as variáveis que influenciam no parâmetro, de forma que a base de cálculo sejam os mesmos algoritmos implantados nos *softwares* para aquisição dos dados, para então ser possível aplicar correções nos locais em que se faz necessário tal intervenção;
- Ter a possibilidade de conhecer os resultados desse parâmetro por bandas de frequências, de modo que, através dos resultados gerados pelos equipamentos, só se tem acesso a um valor único por pontos de medições. Essa opção de valores por frequência possibilita conhecer em quais delas há maior problema e se está dentro da faixa que influência da fala e audição dos espectadores.

As etapas de cálculo deste método foram apresentadas no item 2.3.5 sendo que a Figura 45 apresenta um resumo esquemático das formulações.

Figura 45 - Esquema do método de cálculo analítico do STI.



Fonte: Elaborado pela autora.

Esta análise é realizada pelo comparativo feito entre os resultados de STI gerados pelo método experimental e os resultados obtidos através dos cálculos. Este procedimento é adotado para todas as posições de medições em cada auditório. A partir destes resultados é possível avaliar também, de acordo com a norma IEC 60268-16, a sua classificação subjetiva.

Tendo em vista a possibilidade de aquisição dos dados de STI em bandas de frequências pelo método analítico, a interpretação geral do comportamento da sala pode ser mais detalhadamente analisada, de acordo com as frequências que mais influenciam na fala e na audibilidade.

Esse comportamento por bandas de frequências pode ser analisado por meio dos gráficos de redução da modulação ($m(F_m)$), gerados a partir da influência do ruído de fundo e do nível de pressão sonora da fonte, traduzidos na relação sinal-ruído, junto com o tempo de reverberação do ambiente, para

todas as frequências de modulação da fala. Tal gráfico representa a perda da modulação da voz falada, e seu valor pode variar de 0 a 1 (100% de redução da modulação), ou seja, quanto maior o valor de $m(F_m)$ melhor será a inteligibilidade da fala.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são expostos e analisados os resultados relacionados aos diferentes parâmetros acústicos dos oito auditórios selecionados, com ênfase no critério de inteligibilidade da fala (STI), obtidos através da metodologia utilizada nesta pesquisa, detalhada na seção anterior. Na primeira parte estão os dados obtidos através de experimentos realizados *in loco*, por meio da resposta impulsiva acústica. Na segunda parte são apresentados os valores resultantes do método de cálculos analíticos do tempo de reverberação (TR) e do índice da transmissão da fala (STI), e junto também é realizada uma comparação entre os auditórios sem pessoas, como foram medidos experimentalmente, e uma simulação com pessoas, caso estivessem com lotação máxima. Por fim, é realizada uma análise do fator de redução da modulação $m(F_m)$, por bandas de frequências, determinante no cálculo do STI para cada auditório.

4.1 RESULTADOS DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE

A seguir, é apresentado separadamente o comportamento de cada parâmetro acústico (TR, EDT, Definição, Clareza e STI), analisado nos auditórios e adquiridos conforme exposto na seção 3.4.1.2. A Tabela 15 apresenta um resumo das condições em que cada ambiente foi medido, expondo as datas e horários em que as medições foram realizadas, o nível de pressão sonora contínuo equivalente (L_{eq}) do ruído de fundo, e os dados de temperatura e umidade relativa do ar.

Em relação à avaliação dos ruídos de fundo com as curvas NC da norma NBR 10152, a maioria dos auditórios está de acordo com o máximo aceitável da curva NC 30-35. Apenas o auditório do CTC - Engenharia Elétrica, que atinge a curva NC 40, possivelmente por estar em um local ruidoso muito próximo a uma rodovia que possui alto tráfego de veículos. Essa sensação pode ser percebida no local claramente.

Tabela 15 - Situação ambiental dos dias de ensaios experimentais.

Auditório	Data da medição	Horário da medição	Ruído de fundo (L_{eq})	Temp.	Umidade relativa	Curva NC
			[dB(A)]	[°C]	[%]	
Centro de comunicação e expressão	30/06/2014	14 - 18h	39,8	21	49	30 - 35
Centro de ciências da saúde	09/07/2014	8 - 12h	40,3	18	88	30 - 35
Centro de ciências jurídicas	07/07/2014	14 - 18h	35,2	20	83	30 - 35
Centro de desportos	28/07/2014	8 - 12h	33,9	17	89	30 - 35
Centro de ciências da educação	21/07/2014	14 - 18h	38,8	19,9	57	30 - 35
Centro socioeconômico	16/06/2014	8 - 12h	34,1	20	88	30 - 35
Centro tecnológico - Eng. Produção	30/06/2014	14 - 18h	33,7	20,9	49	30 - 35
Centro tecnológico - Eng. Elétrica	23/07/2014	8 - 12h	44,6	18,6	87	30 - 35

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.1 Tempo de Reverberação (TR)

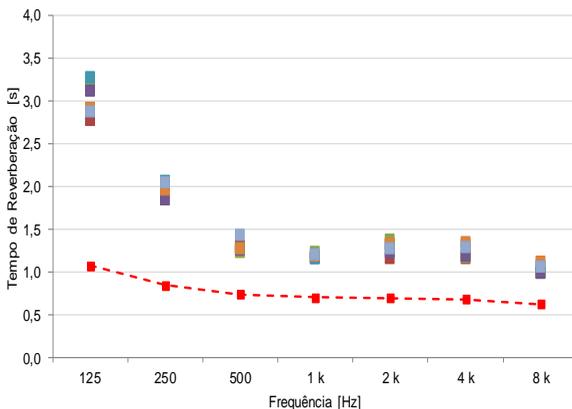
Na Figura 46 estão apresentados os resultados referentes aos tempos de reverberação (TR) obtidos nos oito auditórios em análise, para cada banda de frequência de oitava de 125 a 8.000 Hz, e em seus diferentes pontos de receptores. Observando os gráficos da Figura 46 é possível notar que os auditórios apresentam tempos de reverberação superiores aos recomendados, de acordo com seus respectivos volumes e os tempos ideais estabelecidos pela norma NBR 12179. Esse fato é esperado, em virtude do TR ótimo considerar o efeito absorvedor das pessoas, no caso, quando o ambiente está ocupado, o que não ocorre nas medições *in loco*. No entanto, o auditório do CCJ é exceção, pois os TR acompanham a linha de TR ótimo a partir da frequência de 500 Hz.

Numa análise prévia do estudo que será apresentado nas próximas seções, pode-se julgar este auditório como muito absorvente, em função de que, quando ocupado, seus valores de TR tendem a diminuir ainda mais, ficando em desacordo com os valores ideais. O auditório do CED não aparece como exceção, por possuir valores maiores que o TR ótimo, porém, possui pouca reverberação quando comparado com os demais auditórios.

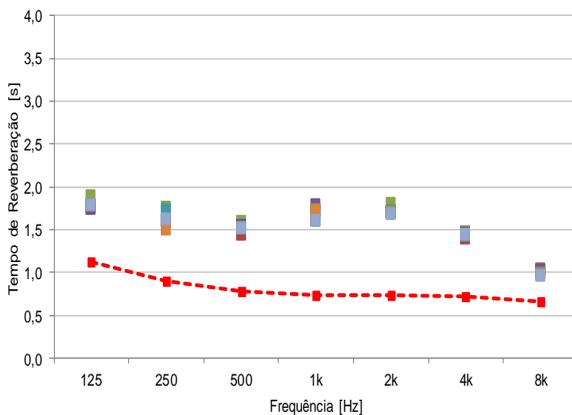
Em todos os oito auditórios, também é possível identificar que as variações do TR não superam os 0,2 segundo para as posições de receptores nas baixas frequências (125 e 250 Hz), enquanto que para as demais bandas de frequência essa variação foi inferior a 0,1 segundo (ver Tabela 16).

Figura 46 - Valores dos tempos de reverberação (TR) por pontos de receptores, por bandas de frequências.

Auditório do CCE

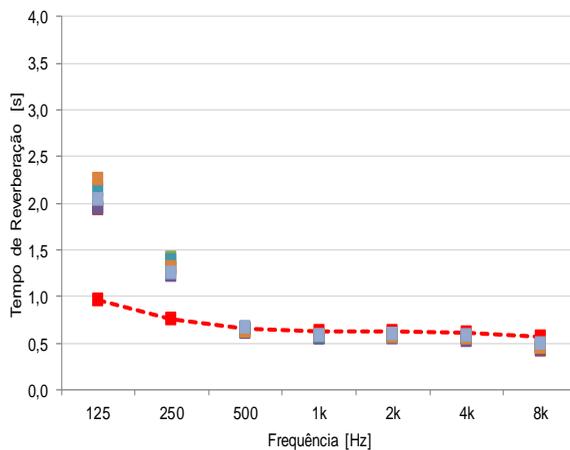


Auditório do CCS

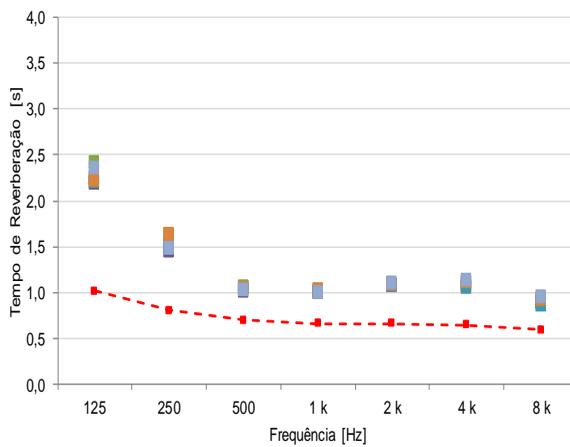


1 2 3 4 5 6 - TR ótimo

Auditório do CCJ

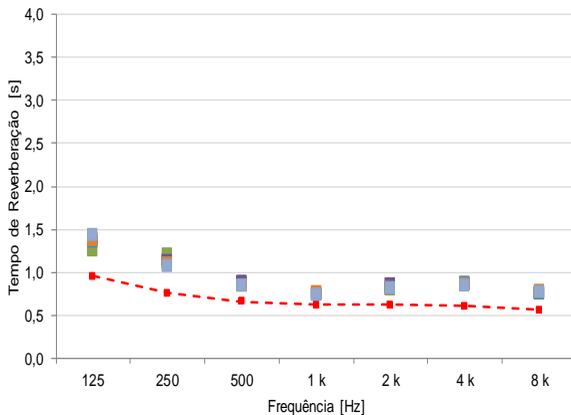


Auditório do CDS

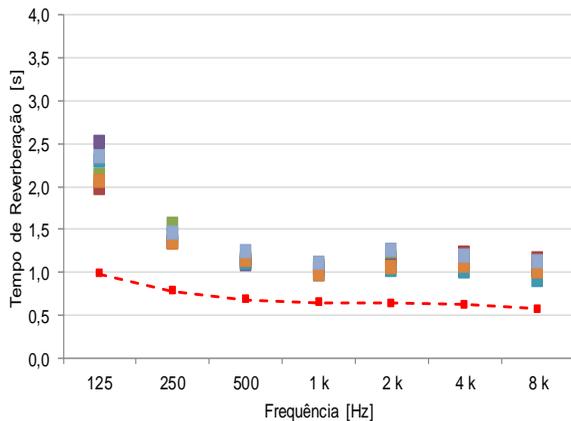


■ 1
 ■ 2
 ■ 3
 ■ 4
 ■ 5
 ■ 6
 - - - TR ótimo

Auditório do CED

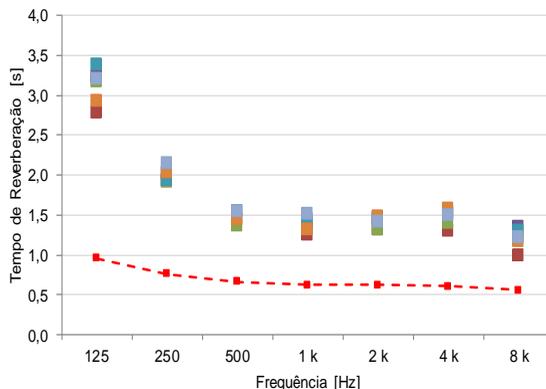


Auditório do CSE

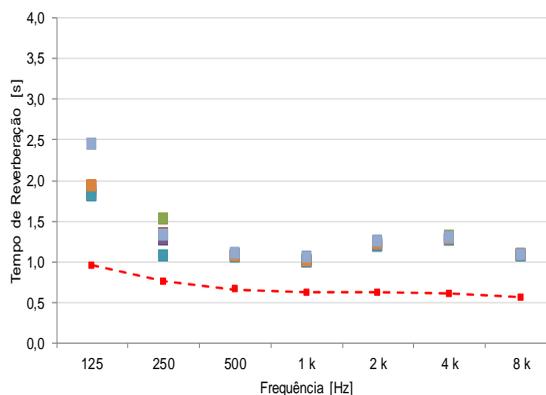


1
 2
 3
 4
 5
 6
 - TR ótimo

Auditório do CTC-EP



Auditório do CTC-EE



■ 1 ■ 2 ■ 3 ■ 4 ■ 5 ■ 6 - - TR ótimo

Fonte: elaborado pela autora.

Na tabela 16 é exposto um resumo dos valores médios e seus respectivos desvios padrão de TR, obtidos para os seis pontos de medição, para cada banda de frequência de oitava entre 125 e 8.000 Hz. Estes valores revelam que os resultados obtidos são coerentes e confiáveis, o que também será reforçado e confirmado nos parâmetros analisados nas próximas seções, principalmente através do EDT, D_{50} e STI.

Na Figura 46 e de acordo com a tabela já citada, considerando a faixa de frequências mais significativas para a

voz, ou seja, entre 500 e 8.000 Hz, os valores de TR em geral mostram-se bons, com exceção do auditório do CCE, CCS e CTC-EP que são mais reverberantes (acima de 1,1 segundo). Nas bandas de baixa frequência (125 e 250 Hz) os tempos foram mais elevados, com ênfase ao auditório do CCE e CTC-EP em que os valores estão entre 2,0 e 3,0 segundos. Nessas bandas o auditório do CCS, anteriormente citado, é o auditório que possui melhor desempenho, ficando atrás apenas do CED.

Este último, por apresentar materiais de acabamento como madeira no piso e palco, gesso em parte das paredes e forro absorvente (como pode ser conferido na tabela 10 e nas Figura 36 e Figura 37) é o auditório que apresenta melhor desempenho no tempo de reverberação. Seus valores de TR variam de 0,8 a 1,4 segundo entre as sete bandas de frequências de oitava do espectro sonoro, com desvios padrão em sua maioria igual a 0, sendo apenas em 125 Hz igual a 0,1 segundo.

O CED pode ser considerado o com melhor desempenho frente ao auditório do CCJ pela ressalva já analisada, ou seja, seus valores, apesar de muito próximos ou menores que o TR ótimo, ocorrem apenas com duas pessoas no local. Quando ocupado, este auditório poderá se tornar muito absorvente, reduzindo a inteligibilidade da fala. Tal comportamento será possível analisar nas próximas seções deste trabalho.

Tabela 16 - Valores médios e desvios padrão do TR de todos os auditórios por bandas de frequência de oitava, medidos sem ocupação.

Auditório	Frequências [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
CCE	3,0±0,2	2,0±0,1	1,3±0,1	1,2±0,0	1,3±0,1	1,2±0,1	1,0±0,1
CCS	1,8±0,1	1,6±0,1	1,5±0,1	1,7±0,0	1,7±0,0	1,4±0,0	1,0±0,0
CCJ	2,1±0,1	1,3±0,1	0,6±0,0	0,6±0,0	0,6±0,0	0,6±0,0	0,5±0,0
CDS	2,3±0,1	1,5±0,1	1,0±0,0	1,0±0,0	1,1±0,0	1,1±0,0	0,9±0,0
CED	1,4±0,1	1,1±0,0	0,9±0,0	0,7±0,0	0,8±0,0	0,9±0,0	0,8±0,0
CSE	2,2±0,2	1,4±0,1	1,1±0,1	1,0±0,1	1,1±0,1	1,1±0,1	1,0±0,1
CTC-EP	3,1±0,2	2,0±0,1	1,5±0,1	1,4±0,1	1,4±0,1	1,5±0,1	1,2±0,1
CTC-EE	2,0±0,2	1,3±0,1	1,1±0,0	1,0±0,0	1,2±0,0	1,3±0,0	1,1±0,0

Fonte: elaborado pela autora.

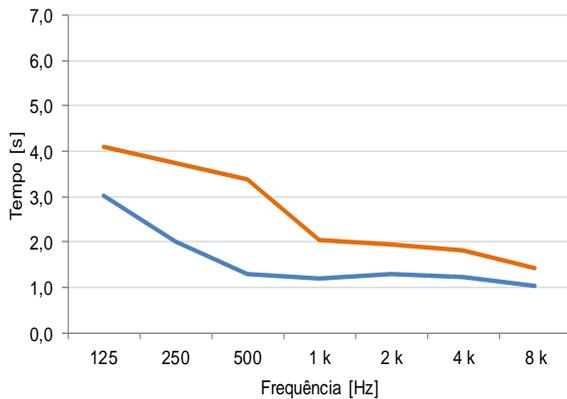
4.1.2 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O Tempo de Decaimento Inicial (EDT), como já exposto no decorrer do trabalho, está vinculado ao TR. Assim, sua análise é realizada através do comparativo entre os parâmetros em função das bandas de frequência de oitava, apresentado nos gráficos da Figura 47, o que permitirá a avaliação da percepção de reverberação do ambiente, se é maior ou menor que o resultado físico do tempo de reverberação medido no auditório.

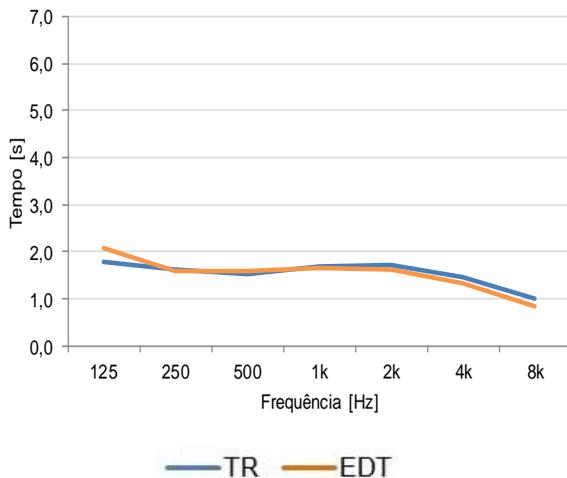
Em geral, os valores de EDT dos oito auditórios seguem a mesma tendência dos seus respectivos valores de TR. A maioria dos ambientes possui valores de EDT maiores que os tempos de reverberação, o que traduz uma análise subjetiva dos auditórios desfavorável em relação aos seus reais comportamentos reverberantes, destacando diferenças significativas principalmente nas baixas frequências (125 – 500 Hz). Nas imagens é possível identificar duas exceções de comportamento, com valores de EDT muito próximos aos valores de TR, ou mesmo abaixo dele, significando menor sensação de reverberação, são eles: O auditório do CCS e do CCJ. É muito provável que esse comportamento esteja vinculado, no primeiro caso (CCS), ao volume e geometria da sala e no segundo caso (CCJ) aos materiais de revestimento, visto que apresenta carpete em todo o piso, incluindo o palco, e também nas paredes paralelas do fundo do palco e fundo do auditório.

Figura 47 - Comparativo entre os valores médios de TR e EDT em função das bandas de frequências

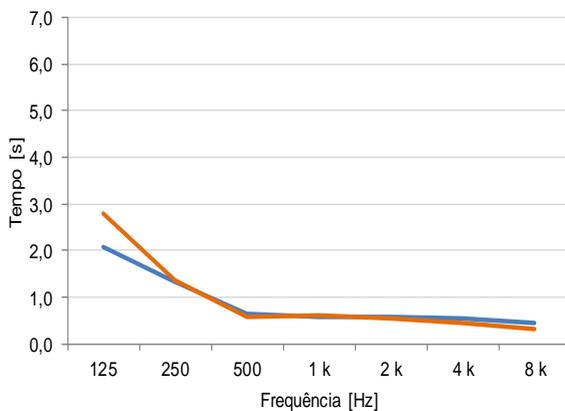
Auditório do CCE



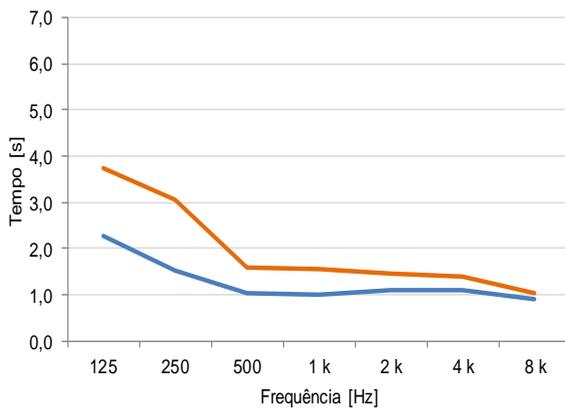
Auditório do CCS



Auditório do CCJ

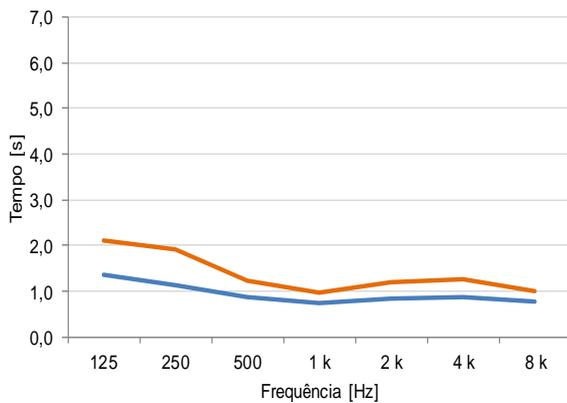


Auditório do CDS

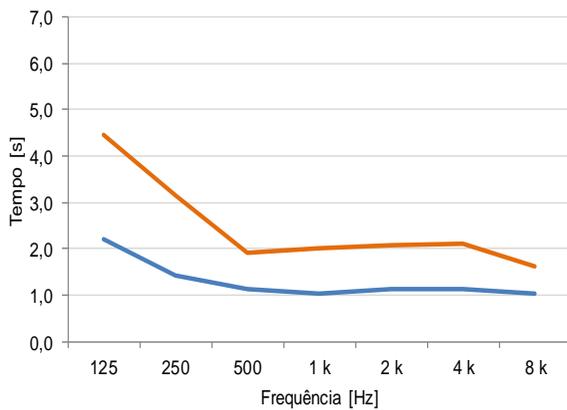


— TR — EDT

Auditório do CED

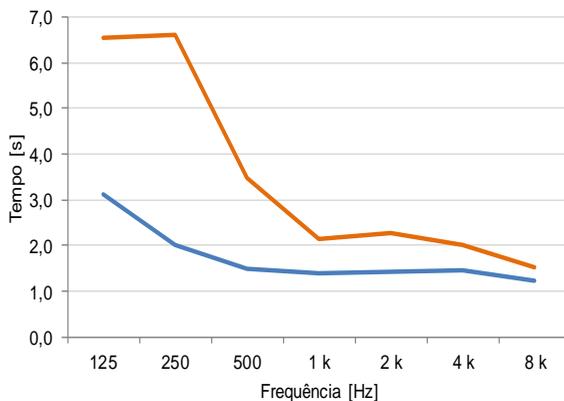


Auditório do CSE

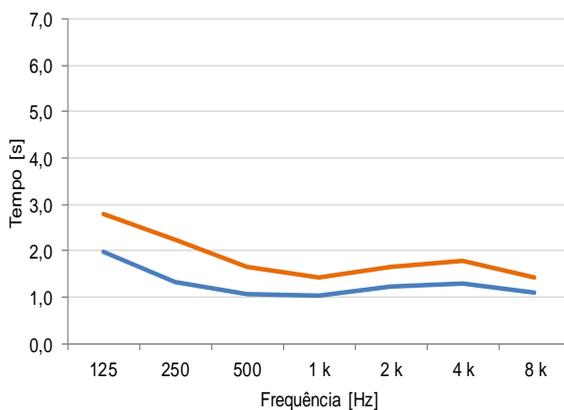


— TR — EDT

Auditório do CTC-EP



Auditório do CTC-EE



— TR — EDT

Fonte: elaborado pela autora.

Na tabela 17 são apresentados os resultados médios de EDT e a diferença entre este parâmetro e o TR para cada banda de frequência de oitava. Comparando esta tabela com a Figura 47, é visível a grande disparidade entre o aspecto físico e subjetivo do auditório do CTC-EP nas baixas frequências (125 e 250 Hz). Esse comportamento se dá em função, principalmente, da geometria da sala, onde as paredes laterais são em forma de “leque” e a parede ao fundo é côncava. Os materiais de

revestimento também podem influenciar nesse desempenho desfavorável. O auditório possui aberturas em vidro e paredes de reboco liso pintado, ou seja, sem muito material absorvente, principalmente nas baixas frequências, como citado, por apresentar os piores valores.

Tabela 17 - Valores médios de EDT e valores da diferença entre EDT e TR para análise por bandas de frequência de oitava para todos os auditórios.

Auditório	Frequências [Hz]													
	125		250		500		1k		2k		4k		8k	
	EDT	Dif.	EDT	Dif.	EDT	Dif.	EDT	Dif.	EDT	Dif.	EDT	Dif.	EDT	Dif.
CCE	4,1	1,1	3,7	1,7	3,4	2,1	2,0	0,8	1,9	0,6	1,8	0,6	1,4	0,4
CCS	2,1	0,3	1,6	0,0	1,6	0,1	1,6	-0,1	1,6	-0,1	1,3	-0,1	0,8	-0,2
CCJ	2,8	0,7	1,4	0,1	0,6	0,0	0,6	0,0	0,5	-0,1	0,4	-0,2	0,3	-0,2
CDS	3,7	1,4	3,0	1,5	1,6	0,6	1,5	0,5	1,5	0,4	1,4	0,3	1,0	0,1
CED	2,1	0,7	1,9	0,8	1,2	0,3	1,0	0,3	1,2	0,4	1,3	0,4	1,0	0,2
CSE	4,5	2,3	3,2	1,8	1,9	0,8	2,0	1,0	2,1	1,0	2,1	1,0	1,6	0,6
CTC-EP	6,6	3,5	6,6	4,6	3,5	2,0	2,1	0,7	2,3	0,9	2,0	0,5	1,5	0,3
CTC-EE	2,8	0,8	2,3	1,0	1,6	0,5	1,4	0,4	1,6	0,4	1,8	0,5	1,4	0,3

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.3 Definição (D_{50})

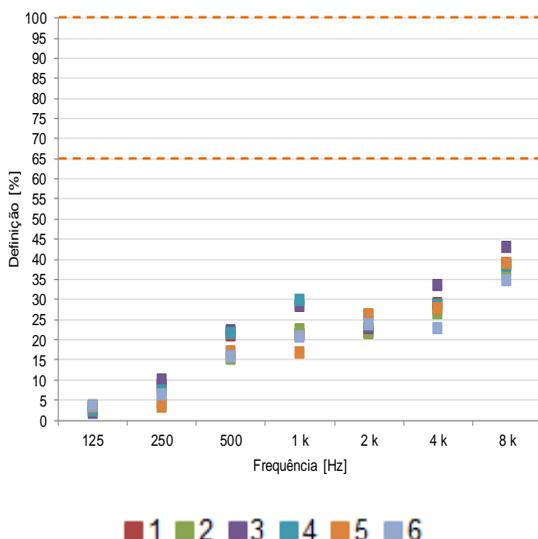
O parâmetro definição (D_{50}) possui uma faixa de valores que varia de 0 a 100%, sendo este último o melhor resultado de desempenho do ambiente. Lembrando que, como mínimo aceitável para a fala, tem-se 65%.

Os gráficos da Figura 48 mostram que a maioria dos auditórios possui definição inferior a 65%, para todas as posições de receptores e bandas de frequências de oitava. O único auditório que atinge a faixa de valores ideais é o CCJ, a partir da banda de 500 Hz.

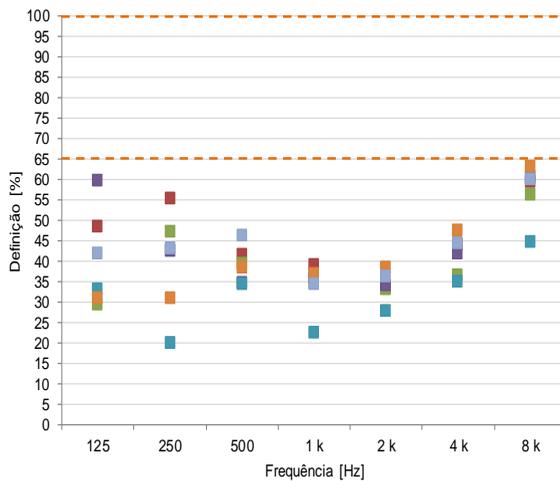
Outra observação possível de ser realizada é que a definição aumenta em função do aumento da frequência. Isso comprova o que a bibliografia descreve de que quanto maior a reverberação de um ambiente menor será a definição produzida pela fala de um orador. Este fator pode ocorrer em função do possível fenômeno de mascaramento das sílabas, considerando que o tempo em que estas permanecem audíveis no local.

Figura 48 - Valores de definição (D_{50}) para todas as posições de receptores em função das bandas de frequências de oitava.

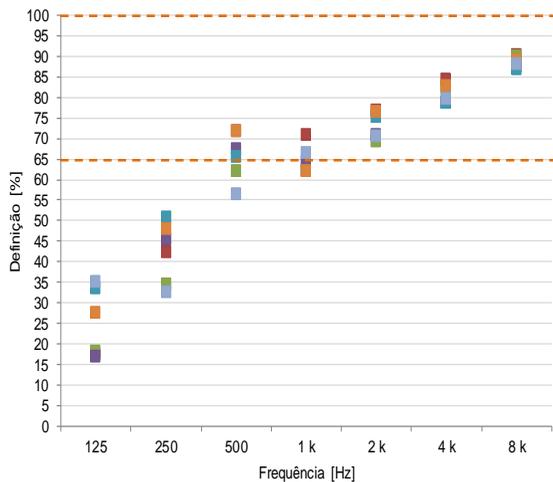
Auditório do CCE



Auditório do CCS

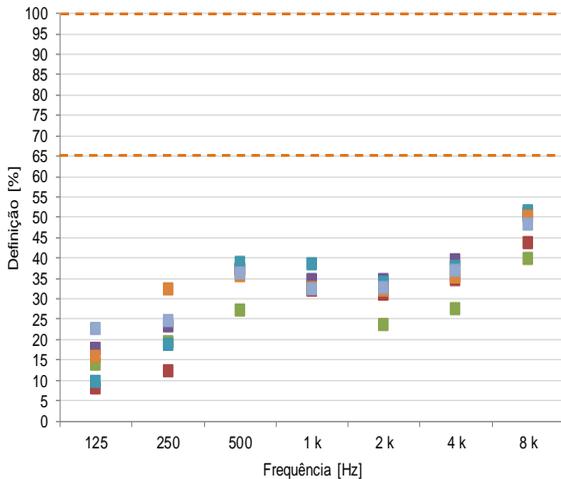


Auditório do CCJ

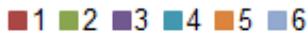
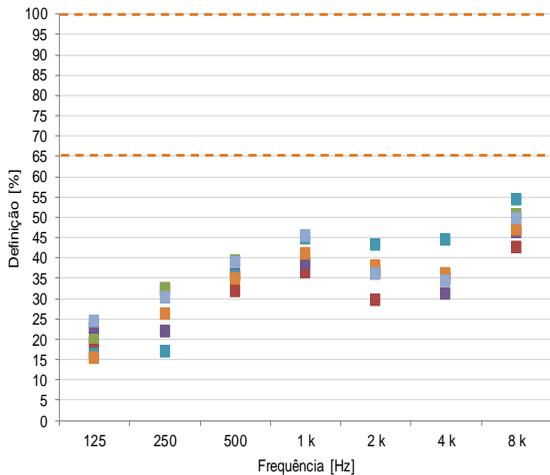


1 2 3 4 5 6

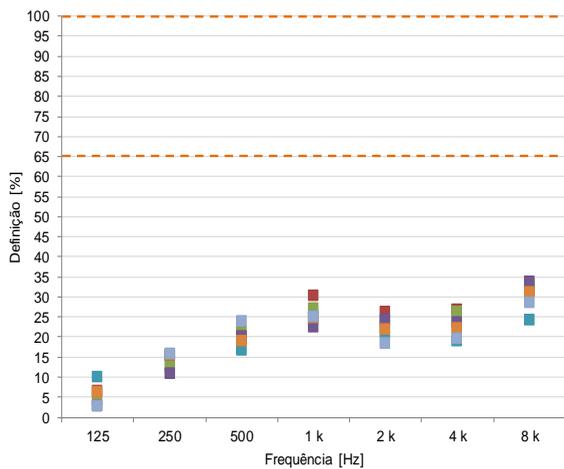
Auditório do CDS



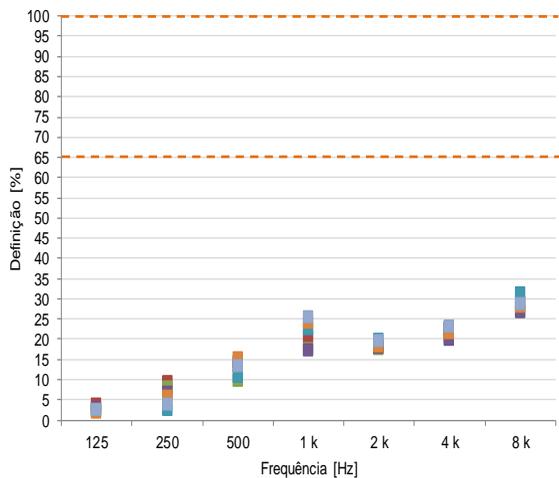
Auditório do CED



Auditório do CSE

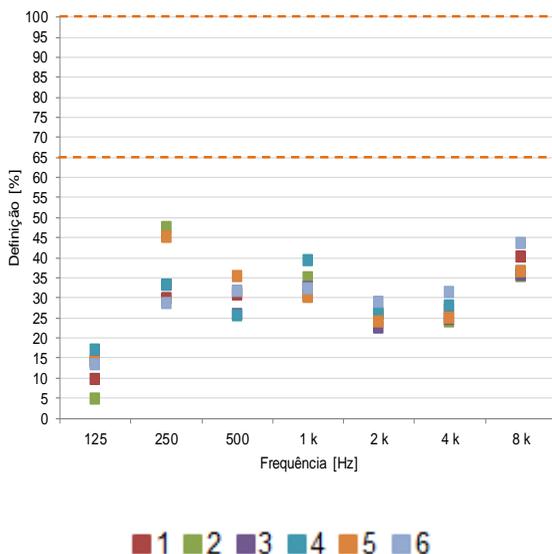


Auditório do CTC-EP



1 2 3 4 5 6

Auditório do CTC-EE



Fonte: elaborado pela autora

Na tabela 18 são mostrados os valores médios de definição e seus correspondentes valores de desvios padrão. Para o auditório com melhor desempenho (CCJ), os valores nas faixas de frequências entre 500 e 8.000 Hz têm a média variando entre 64,6% e 88,7%. Sendo 2 kHz e 4 kHz as bandas de frequência com maior porcentagem de influência na inteligibilidade da fala, este auditório apresenta valores ótimos para todos os pontos medidos na sala. Nas baixas frequências (125 e 250 Hz) a definição diminui, permanecendo entre 27,7% e 42,2%. Para a inteligibilidade, tal situação pode ser relevada em função de que 125 Hz não causa influência na inteligibilidade e 250 Hz é responsável apenas por 5% dela. Os demais auditórios, em geral, não ultrapassam o limite de 57,3% (valor encontrado no auditório do CCS em 8 kHz).

Tabela 18 - Valores médios e desvios padrão de D_{50} por bandas de frequência de oitava para todos os auditórios.

Auditório	Frequências [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
CCE	2,9±0,7	6,6±2,7	18,8±3,2	23,2±5,0	23,7±2,0	28,0±3,4	38,5±2,6
CCS	40,5±11,8	39,8±12,6	39,1±4,5	33,9±5,8	33,8±3,6	41,5±4,8	57,3±6,6
CCJ	24,7±8,3	42,2±7,4	65,8±6,0	64,6±3,5	73,2±3,3	81,1±2,5	88,7±1,4
CDS	14,5±5,4	21,8±6,7	35,2±4,2	33,7±2,5	31,3±4,1	35,2±4,1	47,4±4,6
CED	19,6±3,5	26,6±6,2	35,9±2,8	40,9±3,5	36,6±4,5	36,1±4,5	48,4±4,0
CSE	5,4±2,7	14,2±2,1	20,1±2,3	25,8±2,7	22,6±2,7	22,9±3,3	30,3±3,5
CTC-EP	2,6±0,7	5,9±2,6	12,8±2,2	21,2±3,3	18,5±0,9	21,7±1,3	28,4±1,7
CTC-EE	12,1±4,3	36,2±8,1	30,1±3,7	33,2±3,4	25,4±2,2	26,7±2,7	37,9±3,2

Fonte: elaborado pela autora.

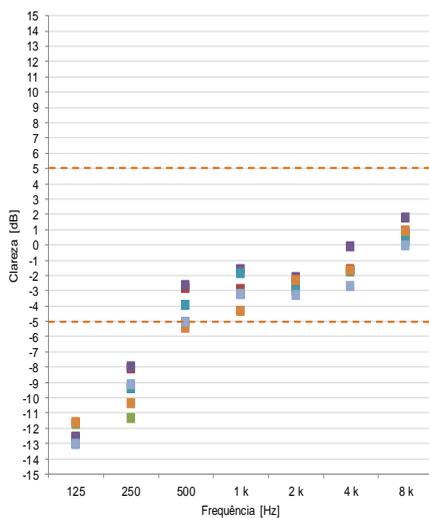
4.1.4 Clareza (C_{80})

Os gráficos da Figura 49 apresentam os resultados de cada ponto de microfone para a clareza, em função das bandas de frequências de oitava. Estando relacionado mais com a música, e ressaltando que a clareza possui uma faixa de valores aceitáveis entre -5 dB e 5 dB, essa apresenta comportamento inverso dos parâmetros já analisados (TR, EDT e D_{50}), ou seja, a maioria dos auditórios possui bom desempenho, principalmente nas médias e altas frequências (a partir de 500 Hz). A exceção é o auditório do CCJ que, nesse caso, apresenta resultados ruins de C_{80} .

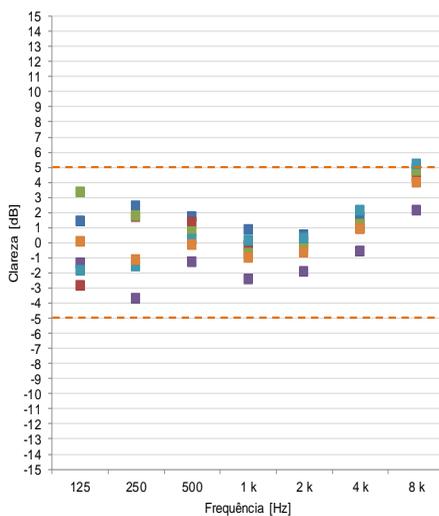
Os três melhores auditórios são dos Centros CCS, CDS e CED, que apresentam todas as frequências dentro da faixa dos valores recomendados, apresentando somente alguns pontos de microfone fora do limite, como é o caso CCS em 8 kHz e do CDS em 125 e 250 Hz. O CED, por ter todos os pontos dentro do limite estipulado, pode ser considerado um auditório com ótimo desempenho para a música. Estes resultados se devem ao conjunto de fatores, como volume da sala, tempo de reverberação e, principalmente, aos materiais utilizados nos revestimentos internos. São estes que interferem diretamente no TR, entre absorção e reflexão, interferindo diretamente no comportamento dos parâmetros do ambiente.

Figura 49 - Valores de clareza (C_{80}) para todas as posições de receptores em função das bandas de frequência de oitava.

Auditório do CCE

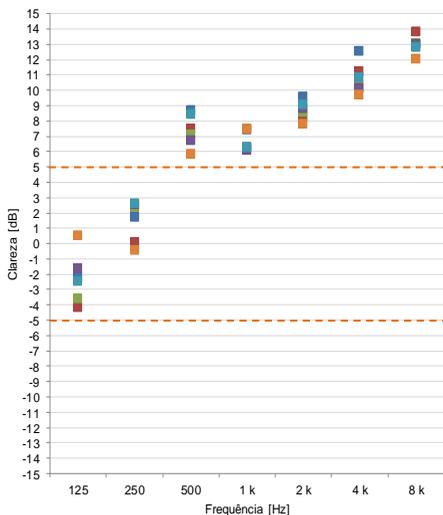


Auditório do CCS

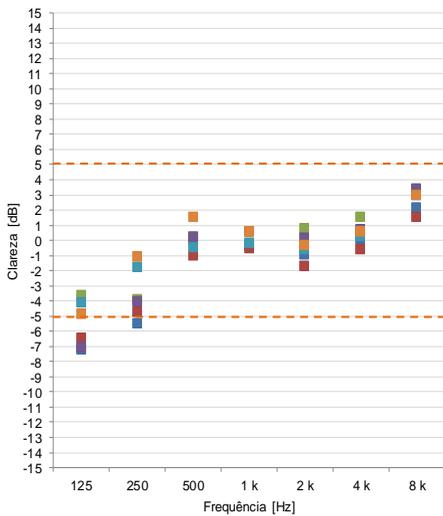


1 2 3 4 5 6

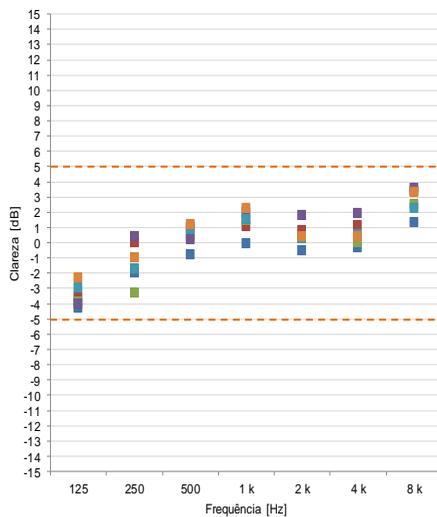
Auditório do CCJ



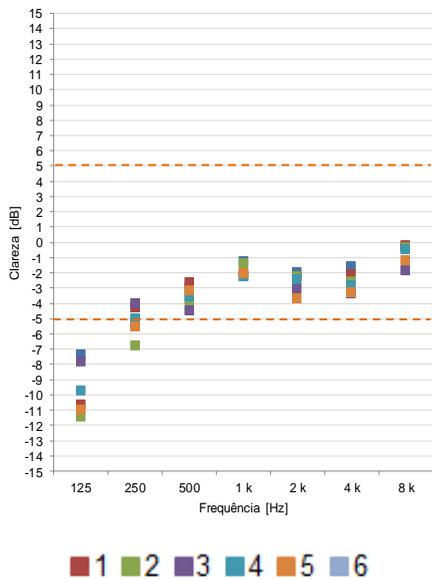
Auditório do CDS



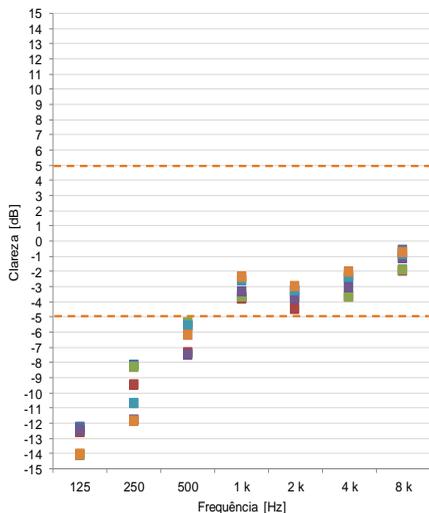
Auditório do CED



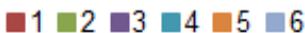
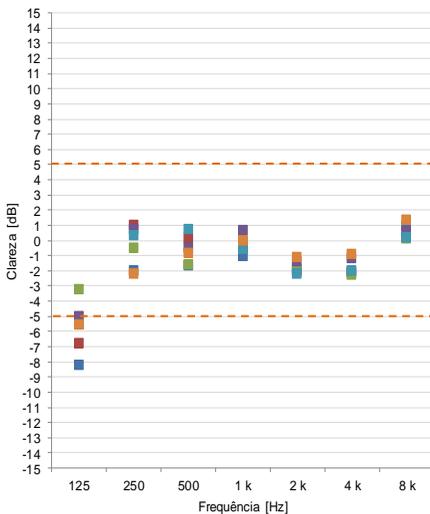
Auditório do CSE



Auditório do CTC-EP



Auditório do CTC-EE



Fonte: elaborado pela autora

Na tabela 19 é possível conhecer, de forma mais precisa, os valores médios de clareza (C_{80}) de todos os auditórios

selecionados para cada banda de frequência e seus desvios padrão, cujos resultados variam entre de -13,5 e 13,3 dB.

Tabela 19 - Valores médios e desvios padrão de C80 para todos os auditórios e bandas de frequências de oitava.

Auditório	Frequências [Hz]						
	125	250	500	1k	2k	4k	8k
CCE	-12,4±0,6	-9,4±1,3	-4,2±1,2	-2,9±1,0	-2,7±0,4	-1,6±0,8	0,7±0,6
CCS	-0,2±2,3	-0,1±2,4	0,4±1,1	-0,6±1,1	-0,4±0,9	1,0±0,9	4,2±1,1
CCJ	-2,3±1,6	1,5±1,3	7,4±1,1	6,8±0,7	8,7±0,6	10,8±1,0	13,3±1,1
CDS	-5,6±1,6	-3,5±1,7	0,1±0,9	0,0±0,5	-0,5±0,8	0,4±0,7	2,7±0,7
CED	-3,5±0,7	-1,3±1,4	0,15±0,7	1,4±0,8	0,5±0,8	0,6±0,8	2,7±0,9
CSE	-9,7±1,7	-5,2±1,0	-3,5±0,7	-1,9±0,4	-2,6±0,6	-2,6±0,7	-0,7±0,6
CTC-EP	-13,5±1,2	-10,1±1,6	-6,3±0,9	-3,3±0,6	-3,6±0,5	-2,9±0,7	-1,2±0,6
CTC-EE	-5,7±1,7	-0,5±1,4	-0,6±0,9	-0,2±0,6	-1,8±0,4	-1,8±0,6	0,6±0,5

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.5 Índice de Transmissão da Fala (STI)

Para análise do STI foi calculada a média em cada posição de receptores, conforme mostrado na tabela 20. Logo após realizou-se uma média entre os pontos receptores e seus respectivos desvios padrão. De acordo com a classificação subjetiva presente na norma IEC 60268-16 (2011), cada auditório foi classificado em: ruim, pobre, razoável, bom e excelente.

Os auditórios do CCE, CCS, CSE e CTC-EP possuem resultados de STI considerados “pobres”, visto que possuem valores abaixo de 0,45. Três auditórios estão como “razoáveis”, como é o caso do CDS, CED e CTC-EE, cujos valores estão entre 0,45 e 0,60. Apenas o auditório do CCJ possui classificação como sendo “bom”, com valor que fica na faixa de 0,60 a 0,75. Todas essas classificações e resultados de STI são coerentes com os resultados dos demais parâmetros (TR, EDT e D_{50}), principalmente o CCJ, que se destaca favoravelmente em todos os casos.

Isso acontece devido à relação que existe do STI com esses outros três parâmetros. Esse vínculo existe na forma de que, quanto menor a reverberação (TR), com acompanhamento do EDT, maior será a definição da fala, ou seja, melhor será a compreensão do ouvinte para com o que está sendo falado pelo orador, que conseqüentemente resulta em um bom nível de inteligibilidade da fala.

Tabela 20 - Valores de STI por posições de receptores, média e desvios padrão e classificação subjetiva dos auditórios.

Auditório	Posição de microfone						Média	Qualidade
	1	2	3	4	5	6		
CCE	0,40	0,38	0,43	0,40	0,39	0,37	0,40±0,02	Pobre
CCS	0,30	0,29	0,31	0,32	0,32	0,36	0,32±0,02	Pobre
CCJ	0,70	0,68	0,69	0,69	0,70	0,69	0,69±0,01	Bom
CDS	0,47	0,47	0,51	0,50	0,50	0,51	0,48±0,02	Razoável
CED	0,51	0,54	0,51	0,57	0,53	0,54	0,53±0,02	Razoável
CSE	0,43	0,44	0,41	0,40	0,43	0,40	0,42±0,02	Pobre
CTC-EP	0,36	0,34	0,34	0,35	0,36	0,35	0,35±0,01	Pobre
CTC-EE	0,46	0,48	0,48	0,49	0,48	0,47	0,48±0,01	Razoável

Fonte: elaborado pela autora.

4.1.6 Discussão e conclusão do método experimental

Como visto, o método experimental é a maneira mais real de se obter a resposta de como um ambiente está se comportando acusticamente. Neste caso não é diferente, e a resposta impulsiva gerada pelo estouro de balões se mostrou adequada, apesar das variações inevitáveis da fonte entre um balão e outro, por isso também a necessidade de ser feita uma média dos valores das repetições realizadas em cada ponto de receptor. Tal validade é retratada nos resultados, pelos baixos valores de desvios padrão e também pela comparação que pode ser realizada com o TR e o STI, visto que eles puderam ser calculados analiticamente, como é mostrado na seção a seguir.

Iniciando uma discussão a partir da análise dos resultados, a maioria dos auditórios estudados se mostrou, nesse primeiro momento, com exceção do CCJ, para o uso a que são destinados, ou seja, para a utilização da palavra falada.

A tabela 21 mostra os resultados médios entre as bandas de frequências de 500 e 1.000 Hz, conforme proposto pela norma ISO 3382, por serem frequências mais representativas da voz dentro das bandas de oitava. Dentre os valores dos parâmetros acústicos encontrados, como já mencionados anteriormente, se destaca o auditório CCJ, por apresentar bons resultados de TR, EDT e D_{50} .

O comportamento deste auditório, junto com o auditório CED, deixa clara a influência dos materiais de revestimento na acústica do local, como por exemplo, o carpete e a madeira, – materiais predominantes nos ambientes, respectivamente – principalmente através do TR e sua análise por bandas de frequências nos gráficos. O CCJ, por exemplo, possui mais absorção nas médias e altas frequências, faixas essas em que o carpete possui maior desempenho de absorção sonora e este ocupa uma área de 33% do total de área absorvente no auditório. No caso do CED a influência é feita pelo forro absorvente e os revestimentos de madeira, o primeiro com área de aproximadamente 25% em relação a área total de absorção da sala, e o segundo com aproximadamente 22% dessa área.

Quanto à geometria do local, sua influência fica evidenciada através do CTC-EP, que possui a parede do fundo (lado contrário ao palco) côncava e as laterais não paralelas, em

formato de leque, ambos atuando como focalizador dos raios sonoros para o centro do ambiente, o que é demonstrado principalmente nos resultados de TR em que os pontos centrais têm pior comportamento, ou seja, valores mais altos, enquanto que os pontos “laterais” próximos às paredes têm melhor comportamento. Neste auditório não se descarta a influência dos materiais pouco absorventes e arquitetura da sala (com aberturas em vidro nas duas paredes laterais).

Desse modo, pode-se dizer que todas as decisões projetuais, sejam elas estruturais ou de revestimento, produzem influências significativas no desempenho da acústica de salas. Nas próximas seções será analisada a influência das pessoas no ambiente, o que irá justificar o porquê de ter sido concluído que todos os auditórios são inadequados, inclusive o CCJ.

Tabela 21 - Resultados médios (500 Hz e 1.000 Hz) dos parâmetros acústicos analisados nos auditórios.

Auditório	Parâmetros Acústicos			
	TR [s]	EDT [s]	D50 [%]	C80 [dB]
CCE	1,2	2,7	21,0	-3,5
CCS	1,6	1,6	36,5	-0,1
CCJ	0,6	0,6	65,2	7,1
CDS	1,0	1,6	34,5	0,0
CED	0,8	1,1	38,4	0,9
CSE	1,1	1,9	23,0	-2,7
CTC-EP	1,4	2,8	17,0	-4,8
CTC-EE	1,0	1,5	31,7	-0,4

Fonte: elaborado pela autora.

4.2 RESULTADOS TEÓRICOS

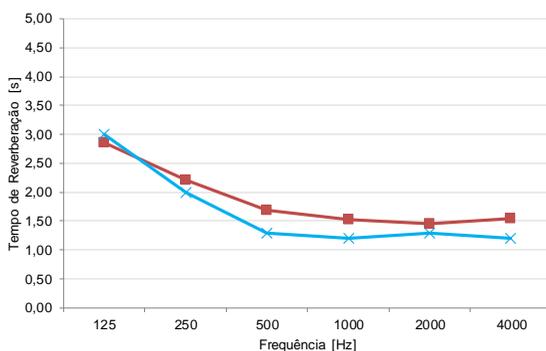
Com o intuito de confrontar com os resultados já obtidos experimentalmente, foi realizado o cálculo do tempo de reverberação dos oito auditórios através da formulação de Eyring, visto que os locais possuíam absorção sonora maior que 0,2. Através dos gráficos da Figura 50, é possível verificar a validação desta etapa e assim ser possível realizar a simulação dos auditórios com a ocupação máxima da sua capacidade e confrontar então o TR de Eyring com o TR ótimo, com finalidade de verificar o comportamento atual do ambiente.

Para sete dos oito auditórios, o método de cálculo de TR coincidiu ou se aproximou do TR experimental, exceto no

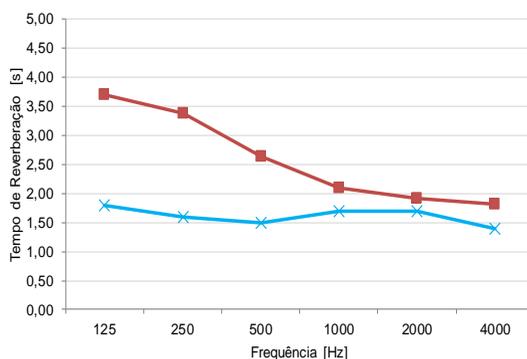
auditório do CCS. Nele, há uma grande disparidade, principalmente nas baixas frequências. Isso se deve, possivelmente, ao fato do ambiente possuir alguns elementos “ocos” e apenas revestidos de carpete, como é o caso dos degraus intermediários da área de audiência e os degraus do palco. Estes elementos, provavelmente, atuam como ressonadores e seus efeitos não são calculados na formulação de Eyring.

Figura 50 - Comparação entre TR experimental e TR analítico de Eyring sem pessoas.

Auditório do CCE

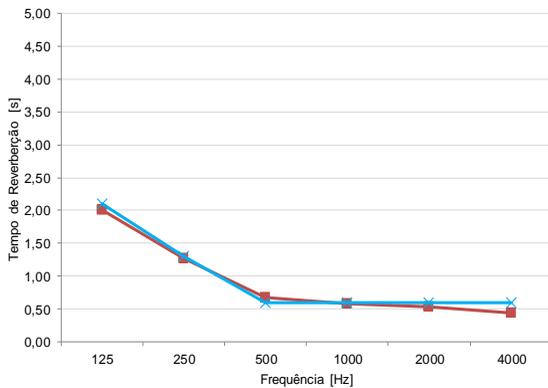


Auditório do CCS

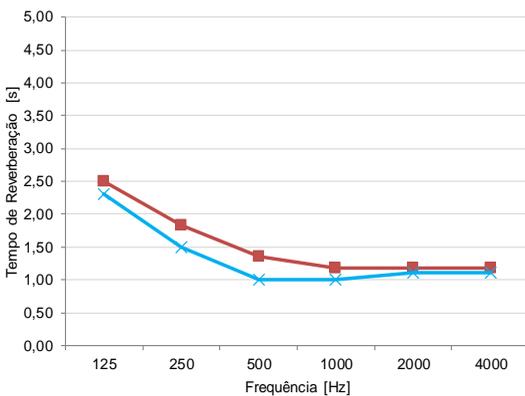


■ TR (Eyring) - sem pessoas × TR experimental

Auditório do CCJ

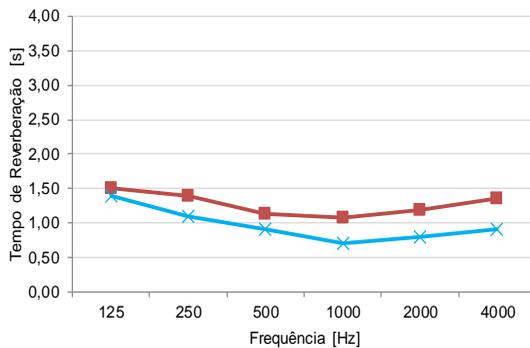


Auditório do CDS

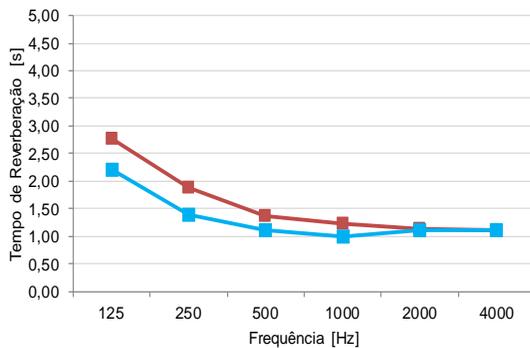


■ TR (Eyring) - sem pessoas × TR experimental

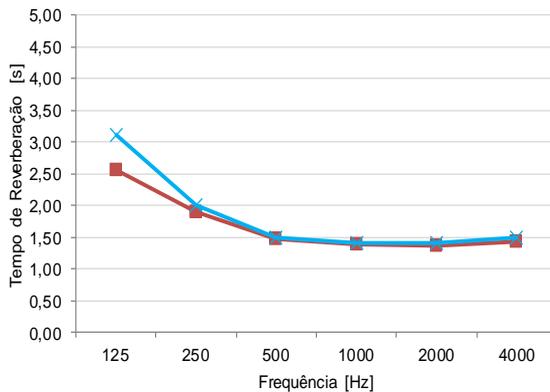
Auditório do CED



Auditório do CSE

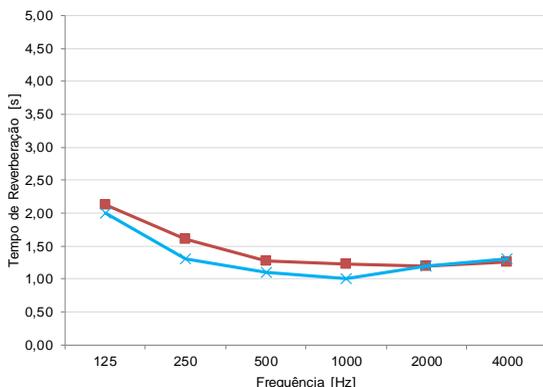


Auditório do CTC-EP



■ TR (Eyring) - sem pessoas × TR experimental

Auditório do CTC-EE



■ TR (Eyring) - sem pessoas × TR experimental

Fonte: elaborado pela autora.

O mesmo procedimento do TR foi aplicado para determinar o Índice de Transmissão da Fala (STI), a partir da formulação do fator de redução de modulação ($m(F_m)$). Primeiramente, foi realizado o cálculo com base nos valores experimentais de TR, para que pudesse ser feita a comparação com os valores já obtidos no método experimental. Logo após, foram calculados os valores de TR para 100% da ocupação do ambiente. Em um estudo mais aprofundado por bandas de frequências de oitava do STI, foram desenvolvidas também análises gráficas do $m(F_m)$ para as duas situações: STI experimental e STI analítico com pessoas.

4.2.1 Tempo de Reverberação analítico

Através dos gráficos da Figura 51 é viável e claro observar a melhora representativa dos valores de TR de Eyring para os auditórios com ocupação de 100%, corrigindo a diferença antes existente nos resultados experimentais e se aproximando dos valores considerados ideais pela norma NBR 12179. Esse novo comportamento é facilmente identificado numericamente e por cores na tabela 22.

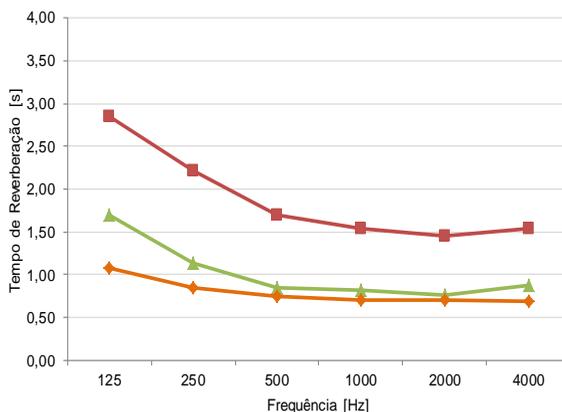
Na análise dos gráficos é visível que as maiores diferenças de valores, quando acontecem, são nas baixas frequências. Isso

acontece por motivos semelhantes observados no auditório do CCS, em que há no ambiente situações de ressonância da onda naquelas frequências, mostra-se inviável acrescentar esse fator no cálculo analítico do TR e, conseqüentemente, do STI.

Com essa simulação de ocupação, fazendo uma retrospectiva aos valores das medições *in loco* alcançados para TR, é possível identificar a representatividade negativa das proximidades dos valores de tempos de reverberação do auditório do CCJ com os valores de TR ótimo. Esse desempenho negativo acontece porque, no momento em que este auditório está com ocupação máxima, o ambiente se torna mais absorvedor do que o ideal, reduzindo a inteligibilidade da fala para os ouvintes.

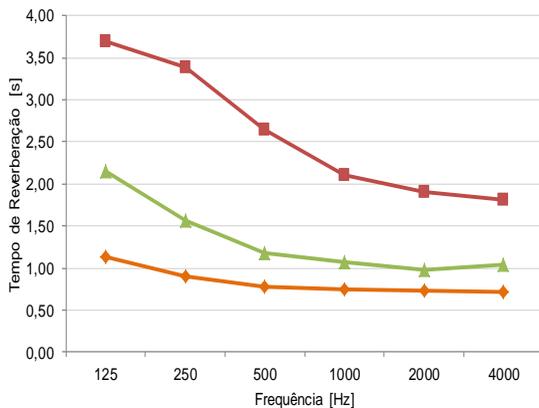
Figura 51 - Comparativo do TR de Eyring com e sem ocupação em função das bandas de frequência de oitava.

Auditório do CCE

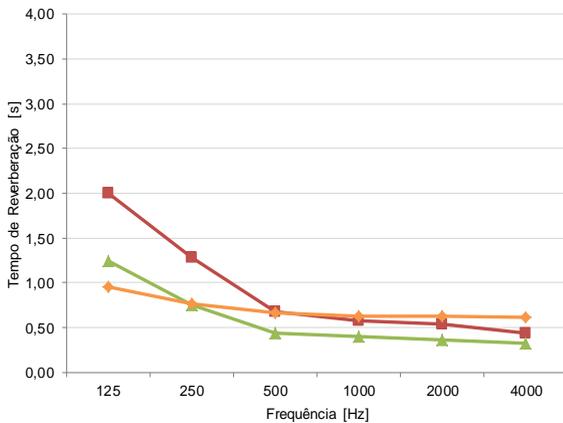


■ TR (Eyring) - sem pessoas ▲ TR (Eyring) - com pessoas ◆ TR ótimo

Auditório do CCS

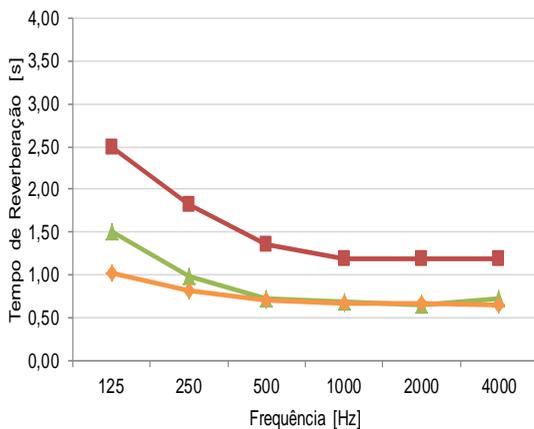


Auditório do CCJ

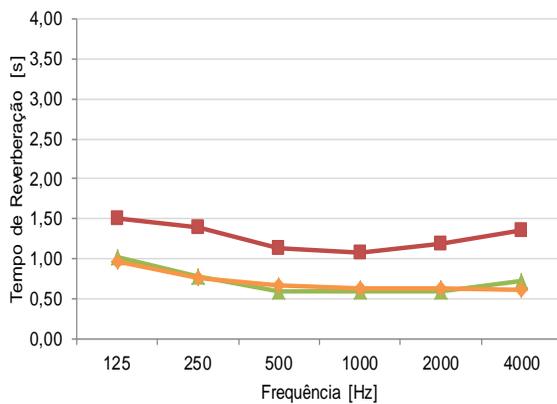


■ TR (Eyring) - sem pessoas ▲ TR (Eyring) - com pessoas ◆ TR ótimo

Auditório do CDS

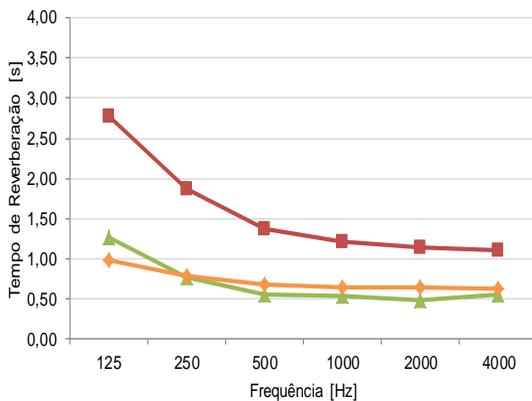


Auditório do CED

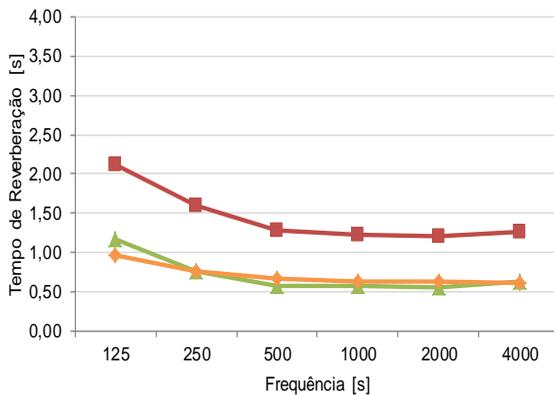


—■— TR (Eyring) - sem pessoas —▲— TR (Eyring) - com pessoas —◆— TR ótimo

Auditório do CSE

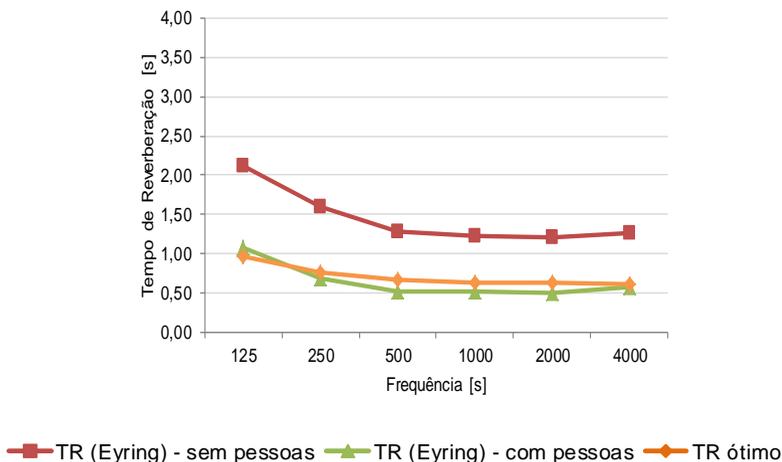


Auditório do CTC-EP



■ TR (Eyring) - sem pessoas
 ▲ TR (Eyring) - com pessoas
 ▲ TR ótimo

Auditório do CTC-EE



Fonte: elaborado pela autora.

A tabela 22 apresenta os resultados entre TR sem pessoas e TR com pessoas, ambos da formulação de Eyring, com valores médios do comportamento individual de cada auditório por bandas de frequências de oitava, que nesse caso chegam até o limite de 4.000 Hz, em função dos coeficientes de absorção sonora de cada material disponível na literatura. Os resultados estão separados entre os que ainda ultrapassam o TR ótimo, os que se aproximam (e se igualam) e os que ficam abaixo do ideal.

Nos valores, em geral, obteve-se uma melhora para todos os auditórios, muitos deles com valores se aproximando no recomendado por norma. Porém, apesar dessa mudança nos resultados, na frequência de 125 Hz apenas o auditório do CED alcançou valor próximo ao ideal, enquanto os demais permanecem com valores superiores ao esperado. Isso acontece em virtude desse auditório já possuir controle das baixas frequências, provavelmente causado pelo efeito dos painéis em gesso acartonado que se tem em partes de uma das paredes laterais, utilizados para fechamento de vão abertos. Porém, considerando a representatividade nula dessa banda de frequência na inteligibilidade da fala, estes resultados se tornam inexpressivos. Para as frequências principais (500, 1.000, 2.000 e 4.000 Hz), a melhora foi significativa, apesar de permanecer

acima do TR ótimo em três auditórios, como é o caso do CCE, CCS e CTC-EP.

O CCJ, como já esperado, ficou com valores abaixo do ideal nessas bandas de frequências principais para a fala, porém, são resultados não tão distantes e que se traduzem em boa inteligibilidade da fala, como poderá ser visto na próxima seção. O mesmo acontece com o CTC-EE, valores que apesar de baixos, permitem uma inteligibilidade da fala boa. Diante deste acontecimento, é válido ressaltar que os valores de referência adotados como ideais têm base apenas no uso e no volume do ambiente, desconsiderando, assim como o cálculo de TR, qualquer geometria, ruído de fundo, e condições da sala.

Tabela 22 - Valores médios de TR analítico com e sem pessoas para todos os auditórios e bandas de frequência de oitava.

	TR médio sem pessoas						TR médio com pessoas					
	125	250	500	1k	2k	4k	125	250	500	1k	2k	4k
CCE	2,85	2,21	1,69	1,53	1,46	1,54	1,70	1,14	0,85	0,82	0,76	0,87
CCS	3,69	3,38	2,65	2,10	1,91	1,80	2,16	1,57	1,18	1,08	0,97	1,04
CCJ	2,00	1,27	0,68	0,58	0,54	0,43	1,22	0,73	0,43	0,39	0,36	0,32
CDS	2,49	1,83	1,35	1,18	1,19	1,18	1,51	0,98	0,72	0,68	0,65	0,71
CED	1,51	1,40	1,12	1,08	1,18	1,35	1,01	0,77	0,59	0,59	0,59	0,71
CSE	2,77	1,88	1,37	1,22	1,14	1,11	1,27	0,77	0,56	0,54	0,49	0,55
CTC EP	2,56	1,89	1,48	1,39	1,35	1,42	1,32	0,84	0,63	0,62	0,58	0,68
CTC EE	2,12	1,60	1,28	1,22	1,20	1,26	1,07	0,69	0,52	0,52	0,49	0,57

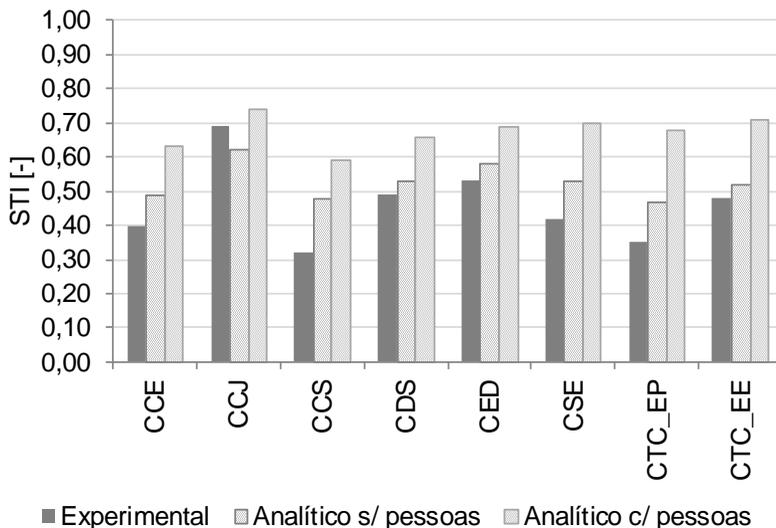
Acima do TR ótimo
 Próximo ao TR ótimo
 Abaixo do TR ótimo

4.2.2 Índice de Transmissão da Fala (STI)

O método de cálculo analítico do STI, para comparação com o STI experimental, foi desenvolvido com valores de TR experimental, portanto, sem pessoas, também com o objetivo de validar os resultados, e em seguida poder realizar a simulação de ocupação. Na Figura 52 é possível visualizar o comportamento dessa comparação, além de junto apresentar valores de STI gerados com a situação de lotação máxima do auditório.

A respeito dos resultados da comparação, estes, que são apresentados numericamente na tabela 23, e isentando a análise de qualquer avaliação subjetiva, têm valores para a maioria dos ambientes que se diferenciam do método experimental em apenas 4 e 7 pontos percentuais, exceto os auditórios do CCS, CSE e CTC-EP que ficam com 16, 11 e 12 pontos percentuais, respectivamente. Quanto ao distanciamento pequeno alcançado de modo geral, e comportamentos semelhantes entre o STI experimental e sem pessoas, seus valores podem ser considerados confiáveis.

Figura 52 - Comparativo entre STI experimental e analítico com e sem pessoas.



Fonte: elaborado pela autora.

Tabela 23 - Valores comparativos entre STI experimental e analítico.

STI	Auditório	POSIÇÕES						
		1	2	3	4	5	6	média
Experimental	CCE	0,40	0,38	0,43	0,40	0,39	0,37	0,40
Analítico sem pessoas (com TR experimental)		0,50	0,49	0,49	0,48	0,49	0,48	0,49
Diferença		0,10	0,11	0,06	0,08	0,10	0,11	0,09
Analítico sem pessoas (com TR analítico)		0,53						
Analítico com pessoas (com TR analítico)		0,63						
Experimental		CCJ	0,70	0,68	0,69	0,69	0,70	0,69
Analítico sem pessoas (com TR experimental)	0,62		0,62	0,64	0,61	0,61	0,62	0,62
Diferença	0,08		0,06	0,05	0,08	0,09	0,07	0,07
Analítico sem pessoas (com TR analítico)	0,67							
Analítico com pessoas (com TR analítico)	0,74							
Experimental	CCS		0,30	0,29	0,31	0,32	0,32	0,36
Analítico sem pessoas (com TR experimental)		0,49	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48
Diferença		0,19	0,18	0,17	0,16	0,16	0,12	0,16
Analítico sem pessoas (com TR analítico)		0,48						
Analítico com pessoas (com TR analítico)		0,59						
Experimental		CDS	0,47	0,47	0,51	0,50	0,50	0,51
Analítico sem pessoas (com TR experimental)	0,53		0,52	0,53	0,53	0,53	0,52	0,53
Diferença	0,06		0,05	0,02	0,03	0,03	0,01	0,04
Analítico sem pessoas (com TR analítico)	0,56							
Analítico com pessoas (com TR analítico)	0,66							
Experimental	CED		0,51	0,54	0,51	0,57	0,53	0,54
Analítico sem pessoas (com TR experimental)		0,58	0,58	0,58	0,59	0,58	0,58	0,58
Diferença		0,07	0,04	0,07	0,02	0,05	0,04	0,05
Analítico sem pessoas (com TR analítico)		0,58						
Analítico com pessoas (com TR analítico)		0,69						
Experimental		CSE	0,43	0,44	0,41	0,40	0,43	0,40
Analítico sem pessoas (com TR experimental)	0,52		0,52	0,52	0,54	0,53	0,51	0,53
Diferença	0,09		0,08	0,11	0,14	0,10	0,11	0,11
Analítico sem pessoas (com TR analítico)	0,56							
Analítico com pessoas (com TR analítico)	0,70							
Experimental	CTC_EP		0,36	0,34	0,34	0,35	0,36	0,35
Analítico sem pessoas (com TR experimental)		0,49	0,48	0,46	0,46	0,47	0,46	0,47
Diferença		0,13	0,14	0,12	0,11	0,11	0,11	0,12
Analítico sem pessoas (com TR analítico)		0,54						
Analítico com pessoas (com TR analítico)		0,68						
Experimental		CTC_EE	0,46	0,48	0,48	0,49	0,48	0,47
Analítico sem pessoas (com TR experimental)	0,52		0,52	0,52	0,53	0,52	0,51	0,52
Diferença	0,06		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Analítico sem pessoas (com TR analítico)	0,57							
Analítico com pessoas (com TR analítico)	0,71							

Fonte: elaborado pela autora.

Validada sua utilização, é realizada então a representação do comportamento do STI por bandas de frequência de oitava, a fim de permitir melhor visualização da influência do TR na inteligibilidade da fala. Este comportamento de cada auditório está apresentado nas Figura 53 aFigura 60 através dos gráficos do fator de redução da modulação $m(F_m)$, sendo (a) a situação mais real, ou seja, apesar de ser o STI calculado (para poder se ter essa demonstração da frequências), é utilizado como dado de entrada o TR experimental. Já (b) apresenta o desempenho do fator de redução da modulação, calculado a partir do TR analítico com pessoas.

Importante e representativo para os resultados do STI, o $m(F_m)$ permite uma análise do comportamento do auditório quanto a sua inteligibilidade por bandas de frequências de oitava e ponderadas pelas frequências de modulação da voz. Estas, mais à frente do trabalho, serão apresentadas com ponderações variando para voz de homens e mulheres, que gerarão resultados de STI para essas duas situações de locutores.

Nos gráficos, foi criada uma marcação padrão para que pudesse ser desenvolvida a análise. Esta marcação acontece nas frequências de modulação da voz entre 2,5 e 5 Hz, centralizando as frequências de 3 e 4 Hz, por serem as frequências que exibem componentes espectrais significativas e nas quais a intensidade da voz é maior (MÜLLER, 2005). No eixo vertical, onde estão os valores de redução da modulação $m(F_m)$, a marcação foi colocada em 0,5 (metade), como sendo valores mínimos limites.

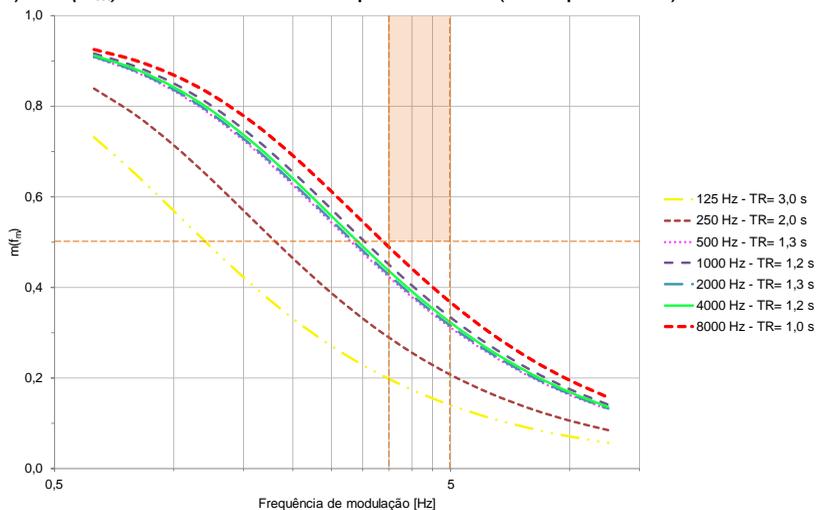
Para cada um desses gráficos, o que é representado é o comportamento das frequências em conjunto com seus respectivos tempos de reverberação de cada auditório, que se traduzem em melhores resultados do $m(f)$ quanto menor for o TR. No caso desses ambientes, os valores das relações sinal-ruído ultrapassam 15 dB, assim, todos eles são fixados em 15 dB, sendo a análise realizada apenas com a influência da reverberação do ambiente. Esta influência do tempo de reverberação exibe um efeito de filtro passa-baixa no comportamento da redução de modulação $m(f)$.

Assim, a interpretação das curvas é feita como um filtro de frequência tipo passa-baixa, ou seja, quanto maior for o valor de $m(F_m)$ maior será a seleção das frequências de modulação da

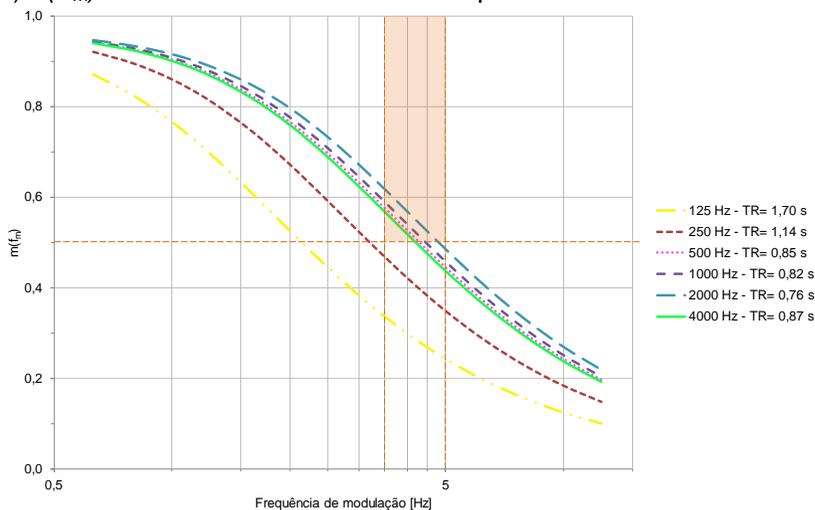
fala, afetando mais as altas frequências do que as baixas. Então, mais quantidade de energia sonora da onda original (voz) chega até o ouvinte. Conseqüentemente, melhor a inteligibilidade da fala. Isto torna ainda mais evidente o quanto a reverberação excessiva é prejudicial dentro da acústica de salas, principalmente para a palavra falada.

Figura 53 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CCE.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).



(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas.



Fonte: elaborado pela autora.

No caso (a) do auditório do CCE, as baixas frequências têm comportamento bastante distinto das demais bandas, situação gerida pelos resultados de tempo de reverberação. Em 125 e 250 Hz o TR é igual a 3,0 e 2,0 segundos, respectivamente. Estes valores de resposta da sala interferem na modulação da fala, fazendo com que o STI também diminua. As frequências entre 500 e 8.000 Hz, que possuem baixo TR, com uma média que está em torno de 1,2 s, interfere menos, elevando as curvas de $m(F_m)$ e, conseqüentemente aumentando o resultado de inteligibilidade da fala.

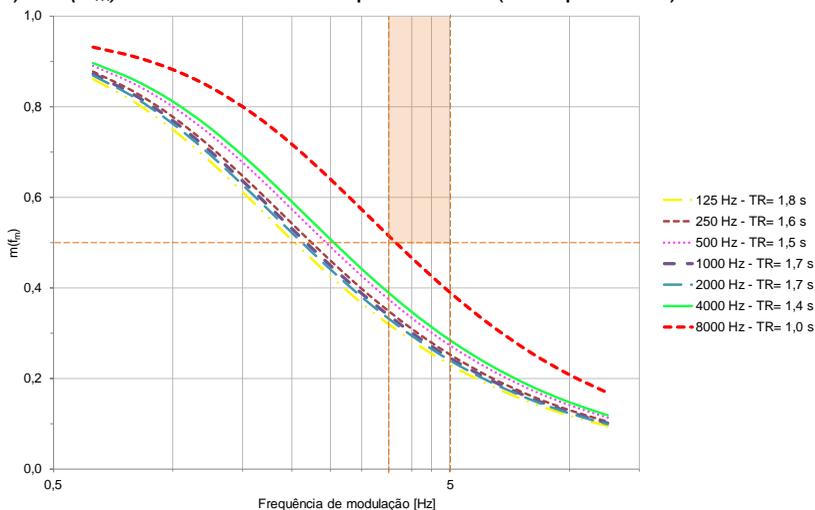
Em (b), com valores de TR menores, todas as curvas se elevam nos valores de $m(F_m)$, que resultam em um aumento da inteligibilidade da fala e do STI. Nas frequências antes citadas de 500 a 4.000 Hz (por ser método de cálculo do TR), com ocupação, a média de TR fica em torno de 0,8 segundo. Neste caso, todas estas frequências estão dentro da marcação estipulada neste trabalho como ideal.

Da mesma forma que o TR experimental e analítico já apresentados do auditório do CCS, o $m(F_m)$ se comporta com curvas não tão satisfatórias, mesmo com ocupação. No caso (a), apenas 8 kHz está na ponta da faixa marcada, isto porque é a única banda de frequência a possuir 1,0 s. As demais bandas

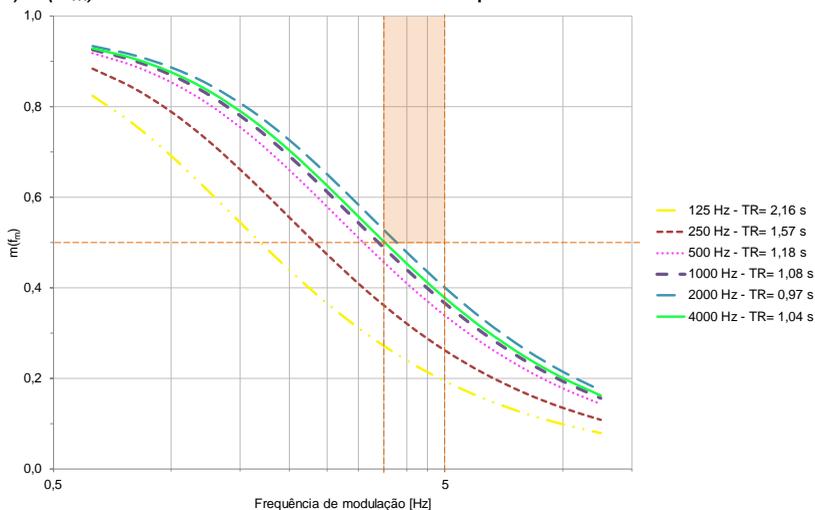
possuem um TR médio de aproximadamente 1,6 s, o que justifica a redução de $m(F_m)$, reduzindo também o STI.

Figura 54 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CCS.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).



(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas.

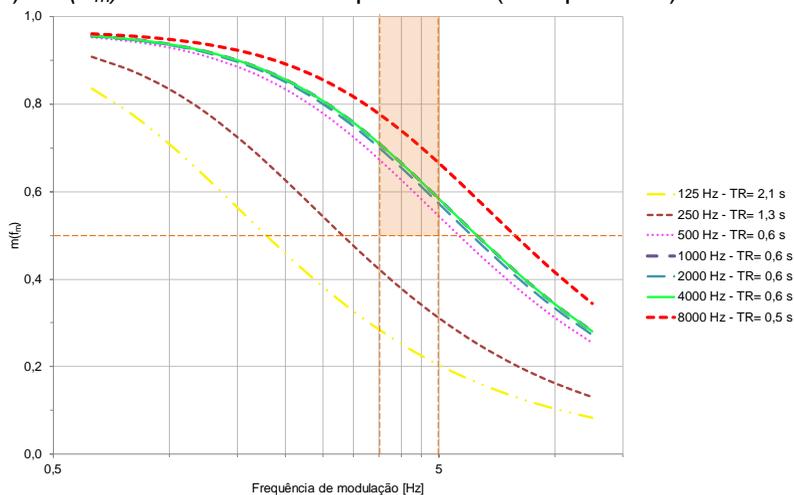


Fonte: elaborado pela autora.

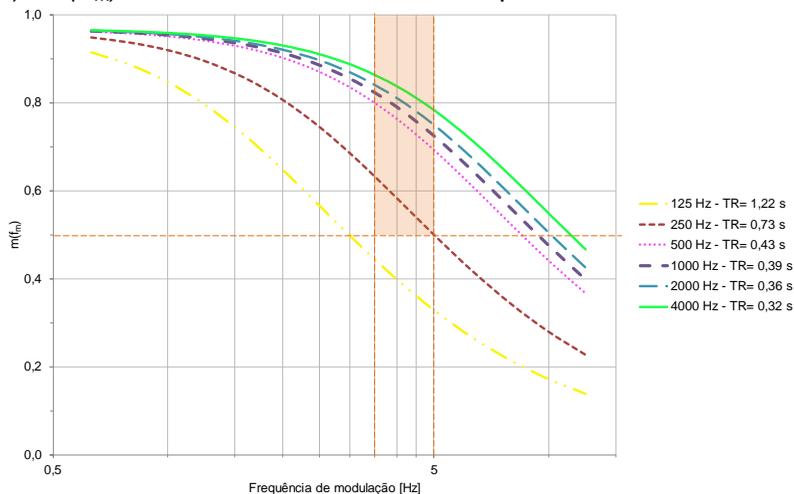
No o caso (b), o comportamento a partir de 500 Hz até 4 kHz melhora, porém, somente a frequência de 2.000 Hz consegue alcançar a faixa de resultados ideais, isto porque é a única a ter TR em torno de 1,0 segundo.

Figura 55 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CCJ.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas)



(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas



Fonte: elaborado pela autora.

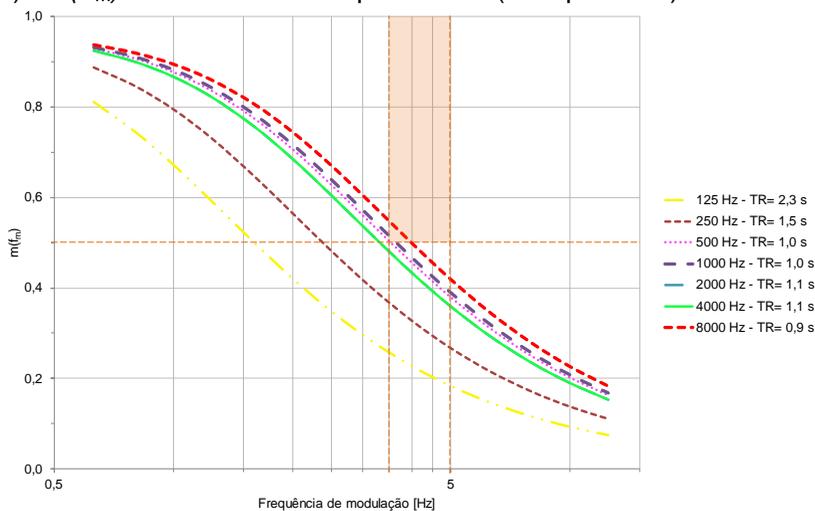
A análise do auditório do CCJ, desde o primeiro parâmetro analisado, se destaca dos demais, e no gráfico de $m(F_m)$ da Figura 55 não é diferente. Com valores de TR baixos já no caso (a), suas curvas aparecem nas frequências acima de 500 Hz dentro da marcação base com TR médios entre as bandas de 0,6 s, enquanto que para as baixas frequências (125 – 250 Hz) a média de tempo de reverberação é de aproximadamente 1,7 s.

É importante ressaltar que, em geral, para os casos em que o TR é superior a 1,0 s, a influência negativa causada no $m(F_m)$ é considerável, assim como o inverso também acontece, casos em que o TR é igual ou inferior a 1,0 s os resultados, tanto de $m(F_m)$ quanto de STI são maiores e melhores.

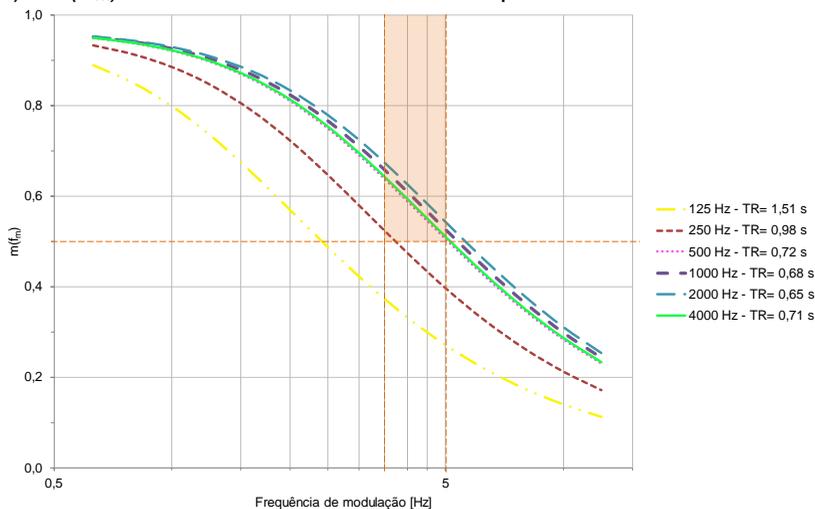
Em (b), com exceção da curva de 125 Hz, todas as demais estão com bom comportamento, estando com TR médio de 0,4 s. Neste caso em que é simulado o comportamento do auditório com pessoas, apesar de tempos de reverberação baixos, o STI do auditório permaneceu na faixa considerada “boa” de avaliação subjetiva, como é apresentado na tabela 23, enquanto que os demais auditórios, apesar de também atingirem a faixa de “bom”, melhorou em comparação aos seus desempenhos quando desocupados. Essa “estabilidade” do CCJ se dá, provavelmente, pelo TR abaixo do ideal encontrado, em que, apesar de não diminuir a inteligibilidade, permaneceu com a mesma avaliação.

Figura 56 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CDS.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).



(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas.



Fonte: elaborado pela autora.

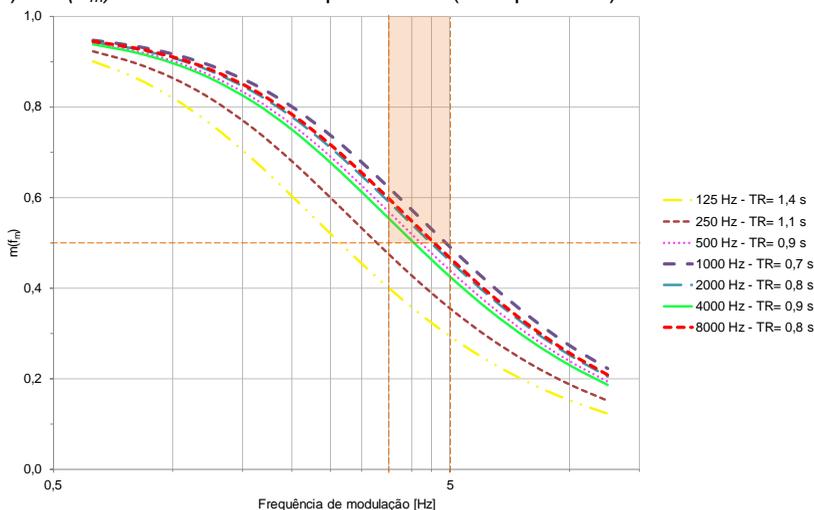
Assim como acontece em grande parte dos ambientes estudados, o auditório do CDS no caso (a) em situação de

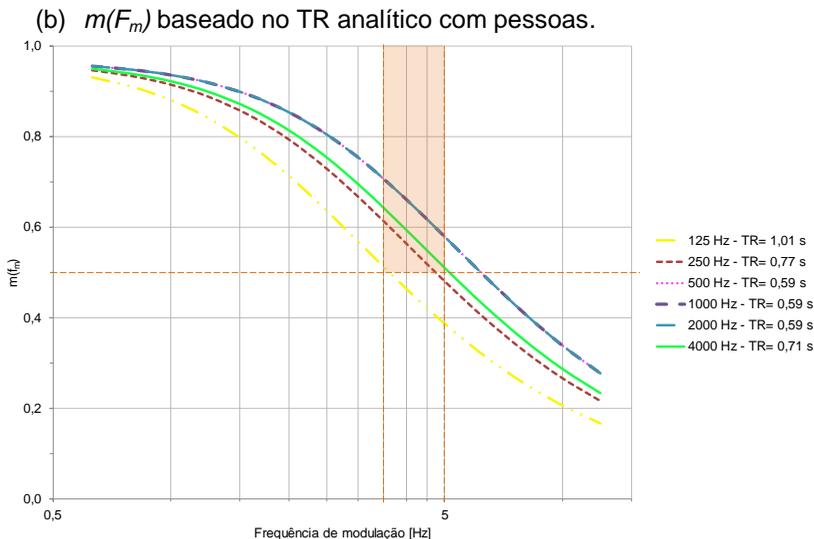
desocupado, apresenta as baixas frequências com baixo valor de $m(F_m)$, o que traduz baixa inteligibilidade da fala. Com TR menor a partir de 500 Hz, as curvas de redução da modulação ficam com valores maiores, portanto, melhor inteligibilidade.

Quando ocupado, representado pelo gráfico (b) da Figura 56, esses resultados têm ganhos consideráveis no seu desempenho. Assim como o TR fica abaixo de 1,0 s a partir de 250 Hz, todas as curvas referentes a essas frequências (250 – 4.000 Hz) ficam com comportamento favorável ao bom desempenho da inteligibilidade da fala.

Figura 57 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CED.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).





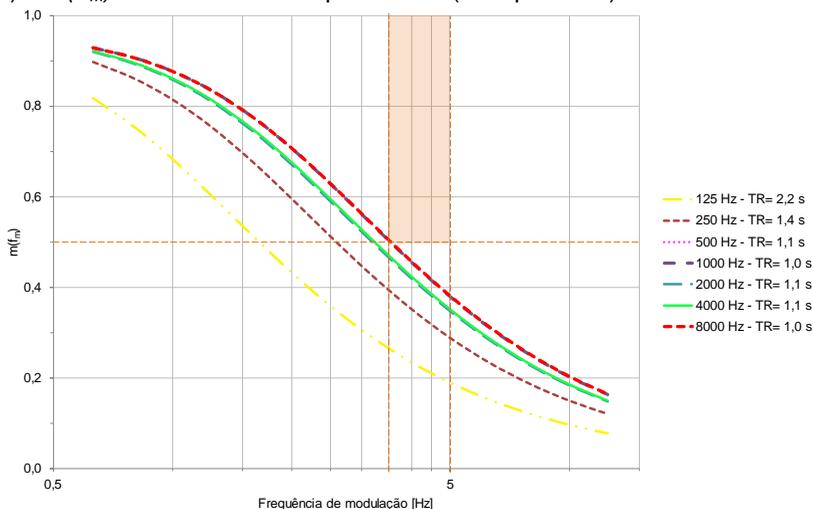
Fonte: elaborado pela autora.

Com um comportamento já considerado bom desde a situação de desocupado, o auditório do CED apresenta curvas de $m(F_m)$ dentro da marcação de referência em todas as frequências que possuem influência na fala, como é o caso de 500 a 8.000 Hz, em que a média entre os tempos de reverberação destas frequências fica em torno de 0,8 s.

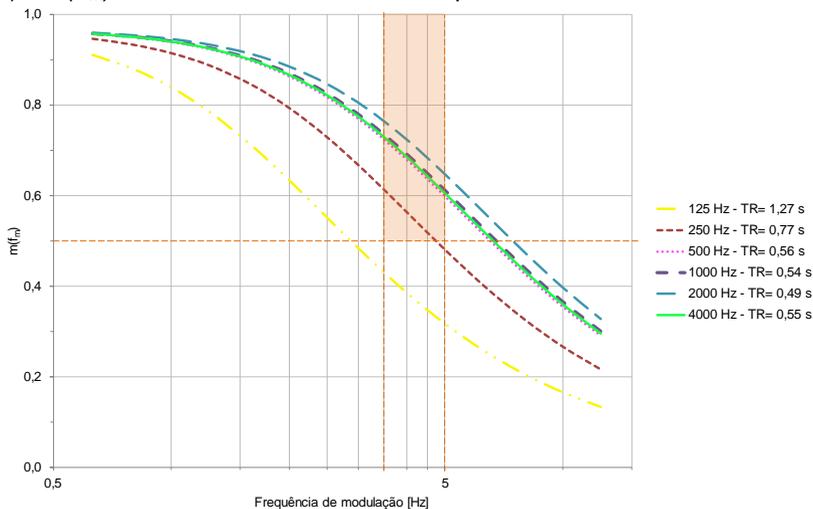
Na situação de ocupado, a melhora ocorre em todas as frequências, inclusive em 125 Hz, que possui TR de 1,0 s. Neste caso, representado em (b) da Figura 57 todas as bandas de frequências de oitava estão com altos valores de $m(F_m)$, resultando em altos valores de STI. Na tabela 23 sua avaliação subjetiva é qualificada como “bom”, com STI igual a 0,69.

Figura 58 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CSE.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).



(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas.



Fonte: elaborado pela autora.

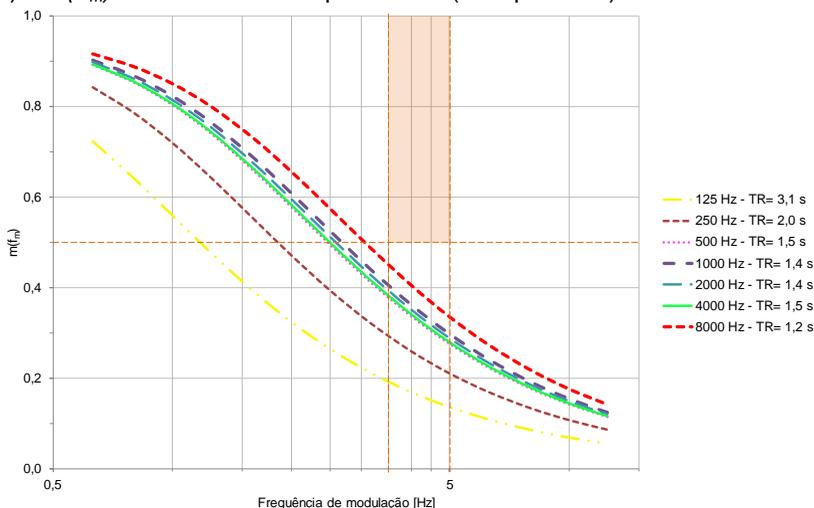
Assim como grande parte dos demais auditórios já apresentados, o CSE representado pela Figura 58, o CTC-EP

pela Figura 59 e o CTC-EE pela Figura 60, no caso (a) apresentam valores de TR altos, portanto curvas de $m(F_m)$ baixas, no CSE alcançando uma pequena parte da marcação base de análise, o CTC-EP possui todas as curvas abaixo desta marcação e o CTC-EE com apenas as frequências de 1.000, 2.000 e 8.000 Hz dentro do aceitável. Nesses três últimos casos a melhora quanto à ocupação permitiu que todas as bandas de frequências permanecessem dentro da marcação, com exceção de 125 Hz no auditório do CSE e CTC-EP.

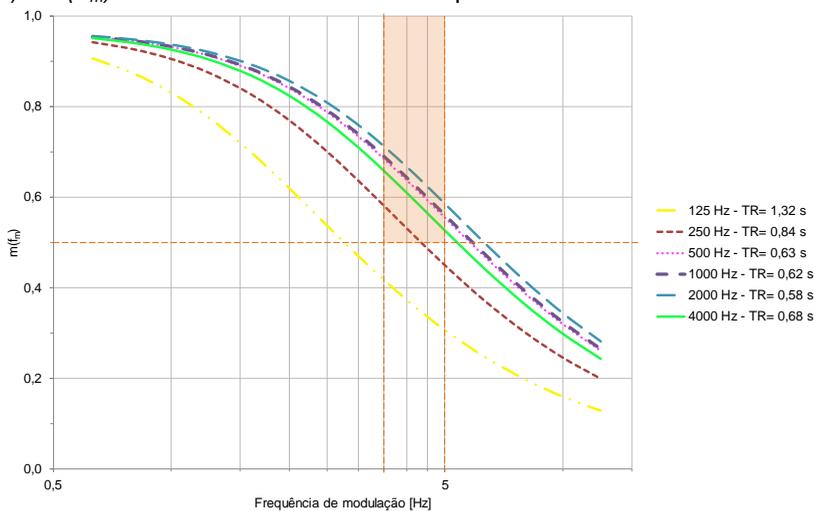
Para os três casos, o TR médio entre as frequências de 250 a 4.000 Hz fica em torno de 0,5 s (CSE e CTC-EE) e 0,6 s (CTC-EP), enquanto que para 125 Hz os tempos de reverberação ficam em 1,2, 1,3 e 1,07 s em ordem para CSE, CTC-EP e CTC-EE.

Figura 59 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CTC-EP.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).



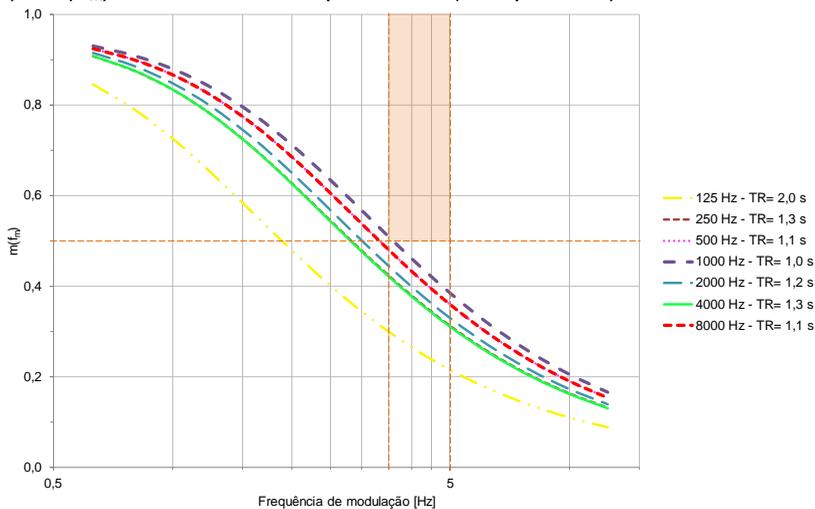
(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas.



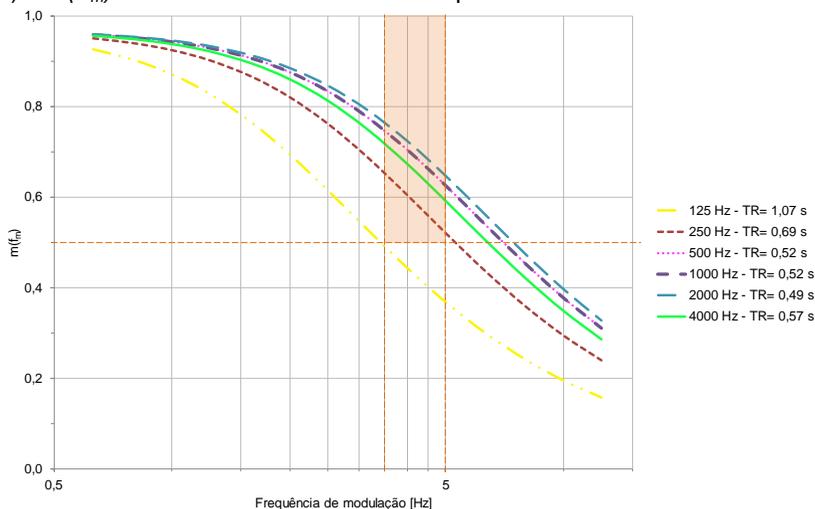
Fonte: elaborado pela autora.

Figura 60 - Comportamento de $m(F_m)$ em função das frequências de modulação da voz no auditório do CTC-EE.

(a) $m(F_m)$ baseado no TR experimental (sem pessoas).



(b) $m(F_m)$ baseado no TR analítico com pessoas.



Fonte: elaborado pela autora.

A fim de complementar o estudo do STI em auditórios, a ponderação para a voz de homens e mulheres, conforme equação 11 (p.53), foi realizada com o cálculo do STI baseado no TR experimental, e está apresentada na tabela 24.

Tabela 24 - STI analítico com ponderação para masculino e feminino

Auditório	STI analítico	STI analítico - masculino	STI analítico – feminino
CCE	0,40	0,46	0,52
CCS	0,32	0,44	0,49
CCJ	0,69	0,59	0,66
CDS	0,49	0,49	0,55
CED	0,53	0,54	0,60
CSE	0,42	0,49	0,55
CTC-EP	0,35	0,44	0,49
CTC-EE	0,48	0,48	0,53

Fonte: elaborado pela autora.

4.2.3 Discussões

Nesta análise com as curvas de redução de modulação $m(F_m)$, é possível visualizar que quanto maior a redução de modulação, melhor será o STI do ambiente. Portanto, uma boa

inteligibilidade da fala ocorre a partir do momento em que a redução de modulação atinge a faixa de frequências da voz entre 3 e 4 Hz e é superior a 0,5, conforme estão delimitados os limites de análise nos gráficos plotados.

Em todos os casos estudados, de acordo com a coerência e a proximidade dos resultados do método analítico com o experimental, podem-se julgar confiáveis os cálculos e a maneira como pode ser interpretado o STI, como no caso, por bandas de frequência de oitava, através das curvas de redução da modulação.

Nessa seção foi possível verificar também a influência da absorção sonora das pessoas dentro de um ambiente. Esta atua reduzindo o tempo de reverberação e, conseqüentemente, alterando os demais parâmetros acústicos relacionados com a resposta impulsiva de cada auditório (EDT, D_{50} e C_{80}). Esta relação pode ter como exemplo que, estando o TR com valores apropriados para o volume e uso do ambiente. O EDT também melhora e que juntos participam da melhora da definição (D_{50}) e, por fim, do STI. Em contra partida, piora a clareza (C_{80}), que apresenta na frequência um comportamento inverso ao da definição e compromete a qualidade acústica da música e o reconhecimento das notas musicais nos auditórios analisados.

Em geral, a qualidade dos resultados dos parâmetros acústicos levantados no interior de cada ambiente depende do equilíbrio entre a absorção sonora (tempo de reverberação) e os níveis da relação sinal-ruído entre o nível de pressão sonora da fonte e do ruído de fundo.

5 CONCLUSÕES

Esta seção apresenta as conclusões, geradas a partir dos resultados obtidos, as limitações encontradas e as sugestões para trabalhos futuros. Através desta pesquisa procurou-se, além de conhecer o comportamento acústico dos auditórios escolhidos, apontar o desempenho da utilização de balões para geração do sinal impulsivo e o comportamento dos resultados do método analítico, bem como a possibilidade de análise do parâmetro que mede a inteligibilidade (STI) por bandas de frequência. Estes dois últimos, com a ideia de suprir as necessidades básicas de profissionais que não tenham acesso aos equipamentos e softwares de simulação computacional, além de poderem ser utilizados como ferramenta de projeto.

5.1 CONCLUSÕES SOBRE A METODOLOGIA

A metodologia proposta consistiu na avaliação acústica de oito auditórios da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), diferentes entre si, porém, com alguns itens como volume e capacidade de ocupação aproximada, o que permitiu a comparação entre eles com os resultados de comportamento acústico obtidos em cada ambiente. Através do método experimental pela medição da resposta acústica impulsiva, ou seja, de medições *in loco*, foram obtidos os valores referentes aos parâmetros acústicos como TR, EDT, D_{50} , C_{80} e STI.

Com desvios padrão baixos no método experimental e com pequenas diferenças entre as medições e o método analítico, julgou-se apropriada a metodologia utilizada nesta pesquisa. O método experimental permite a obtenção de resultados precisos e confiáveis, pelo fato de ser aplicado no ambiente já construído, sendo possível considerar inclusive a influência da sua geometria e materiais reais na acústica do local. Enquanto o método analítico permite o estudo do comportamento de salas ainda no período de tomada de decisões de projetos. Este, não apresenta precisão da realidade quando comparado com o experimental, mas gera resultados muito próximos, que possibilita a análise acústica do ambiente previamente à sua construção. É necessário, porém, ressaltar a extrema importância em ter uma boa base de dados e obter coeficientes de absorção dos materiais com a máxima proximidade possível dos materiais

reais presentes no ambiente. Tais valores tem grande influência nos resultados, sendo possível concluir que, com uma boa base dados os valores gerados são ainda mais próximos do real.

5.2 CONSIDERAÇÕES QUANTO AOS RESULTADOS

Ao desenrolar da metodologia deste trabalho, principalmente para execução da etapa analítica e análise, tanto desta, quanto da etapa experimental, foi necessário a aquisição de conhecimento de todos os parâmetros acústicos envolvidos e quais seus efeitos no julgamento subjetivo do comportamento acústico da sala, visto que todos estão interligados, além do conhecimento da relação existente entre a arquitetura como edificação e a acústica de salas. Neste caso, os estudos para compor a revisão bibliográfica foram fundamentais para a compreensão e conhecimento do assunto, servindo como base para o desenvolvimento do trabalho.

A análise dos resultados se deu conforme já exposto na conclusão anterior, em que foram citados os baixos desvios padrão que ocorreram entre os resultados das repetições e posições realizadas em cada auditório, e diferenças pequenas entre os valores médios finais dos ambientes e entre métodos. Exemplo claro destes baixos distanciamentos são os resultados apresentados na comparação entre TR experimental e TR analítico de Eyring. Quanto às características físicas do espaço, estas tiveram suas análises baseadas também no comportamento dos parâmetros e em quais frequências se encontra o problema, quando ele existir.

Desta comentada interligação entre os parâmetros é possível retratar a grande influência causada pela absorção sonora em um ambiente, o que também faz relação com a etapa de projeto por causada pelos materiais de revestimento. O cuidado que se deve ter com a absorção do som é com o objetivo de não tornar o ambiente muito reverberante nem muito absorvente, e de igual forma, saber posicionar estes elementos de absorção ou reflexão sonora, pois as duas situações acima citadas são prejudiciais para a inteligibilidade da fala. Como já explicado na discussão dos resultados da etapa analítica em seções anteriores do trabalho (seção 4.2.3), a absorção sonora influencia diretamente no tempo de reverberação. Com um TR baixo, o EDT também tende a ser baixo, aumentando os valores

de D_{50} - em função da baixa reverberação -, reduzindo os valores de C_{80} - por este ser vinculado à música e necessitar de mais reverberações - e aumentando também a inteligibilidade da fala, consequência do vínculo entre TR e relação sinal-ruído.

Com o método experimental, buscou-se conhecer os auditórios escolhidos, além de servir como base para comparação e validação do método analítico. De uma forma geral, a julgar somente os resultados das medições, todos os auditórios quando desocupados, estão com desempenho acústico ruim, se apresentando muito reverberantes e, conseqüentemente, reduzindo os demais parâmetros vinculados à palavra falada.

A implementação dos cálculos e a validação positiva dos seus resultados permitiu a avaliação dos mesmos ambientes quando ocupados pelos ouvintes - situação que mais se aproxima da realidade e é representativa no estudo da inteligibilidade da fala. Nesta última situação foi possível verificar uma melhora significativa em todos os locais e bandas de frequências de oitava. Julga-se então que todos os ambientes analisados, se lotados, apresentam, de acordo com a norma IEC 60268-16/2011, mudança da classificação “razoável” para “bom” quanto à avaliação subjetiva acústica do auditório. Porém, na medida em que diminui o número de pessoas, aumenta a reverberação, diminuindo a inteligibilidade da fala, já que o ruído de fundo foi mantido igual e constante em todas as análises, como se ocupasse uma posição de não influente no local.

Com todos os valores plotados e com as plantas baixa dos ambientes, é possível julgar que em determinados casos, como os auditórios CCS, CCJ e o CTC-EP, que possuem geometrias bastante distintas, essas influenciam diretamente na resposta acústica do ambiente. O auditório CCS, que foi o único a apresentar grande divergência de valores em baixas frequências de oitava (125 a 500 Hz), tem esse comportamento que pode ser justificado tanto pela geometria do ambiente, quanto pelos acabamentos (caso dos degraus ociosos e revestidos de carpete). Com vínculo aos acabamentos da sala estão os resultados do auditório CCJ que utiliza carpete no piso e na parede do palco e do fundo, enquanto que no caso do auditório CTC-EP, a principal influência é da geometria com as paredes laterais em leque e a do fundo, côncava. Assim, fica evidente a influência do projeto e tomadas de decisões projetuais na acústica arquitetônica.

Dentre todos os resultados obtidos em ambos os métodos e diante da comparação entre eles, conclui-se como confiável o método de cálculo, tanto de TR quanto de STI. De fato que também se pôde concluir satisfatória a utilização das curvas de redução de modulação para análise do índice de transmissão da fala por bandas de frequência de oitava. Esta análise permite a distinção dos problemas que podem estar ocorrendo no ambiente para então podê-las sanar, objetivando a melhora da comunicação da palavra falada nos ambientes em questão.

Esses cálculos e representações gráficas, utilizados na segunda parte da metodologia do trabalho e suas validações quanto a sua confiabilidade, permitem disponibilizar aos projetistas e profissionais da área da acústica arquitetônica uma ferramenta alternativa para determinar o STI de uma sala, antes mesmo da sua construção e utilização. Estes recursos podem ser úteis nas tomadas de decisões projetuais, tanto em consideração à geometria, quanto aos materiais de revestimento.

Finalmente, alcançado os objetivos do trabalho, sintetiza-se a conclusão de que a metodologia adotada para a geração do sinal impulsivo é bem empregada para o fim a que está destinada e às frequências a serem alcançadas. Os métodos de cálculo analítico de TR e STI podem ser utilizados como geração de resultados pela sua confiabilidade, e são recomendados para auxiliar os projetos antes das suas execuções. Também se mostrou altamente válido e confiável o desenvolvimento das curvas de redução de modulação $m(F_m)$ para análise do comportamento do STI de acordo com as bandas de frequências de oitava.

Com vista ao caráter arquitetônico em que, há a preocupação de vincular as diversas áreas da profissão, seja ela, acústica arquitetônica ou os demais confortos ambientais, eficiência energética, estética e funcionalidade; cabe uma crítica em relação ao auditório do CCJ. Essa crítica é baseada no fato de que mesmo o auditório possuindo bom comportamento acústico, suprimindo as necessidades do local quanto a inteligibilidade da fala e apresentando bons resultados no estudo, ele não cumpre aos demais cuidados exigidos em um projeto arquitetônico.

O profissional da arquitetura deve sempre permitir conforto ao usuário isto engloba conforto acústico, visual e térmico. No caso desse melhor auditório analisado acusticamente (CCJ), ele

é falho na visibilidade do espectador ao palco, - considerando que é um ambiente que foi planejado para ser uma sala de aula e não um auditório, sendo então, seu uso adaptado - e para possuir conforto térmico necessita aparelhos de ar condicionado. Esses inclusive, quando ligados, é possível que prejudiquem a audibilidade do ambiente, comprovando a não inter-relação dos tópicos importantes do conforto ambiental tratados na profissão. Tal comprovação fica como sugestão para trabalhos futuros, conforme apresentado a seguir.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são apresentadas algumas limitações enfrentadas durante a realização deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

5.3.1 Limitações do trabalho

Como limitação deste trabalho tem-se:

- Outros parâmetros acústicos vinculados à palavra falada, como SI, RASTI, AI e %ALCons, em função do recorte do trabalho, que não abrangia estudos subjetivos, não foram considerados.

5.3.2 Sugestões para trabalhos futuros

Sem a intenção de esgotar os estudos a respeito deste tema, a partir desta pesquisa sugere-se a continuidade do assunto através de algumas propostas:

- Utilização de simulação computacional, a fim de comparar os resultados dos parâmetros acústicos levantados experimentalmente para os auditórios e, assim, verificar a possível proximidade dos valores;
- Propor, através da simulação computacional, melhorias para os auditórios avaliados com destaque negativo nos resultados, como nos auditórios CCS e CTC-EP;
- Investigação do comportamento acústico dos auditórios mediante análise subjetiva que envolva a

auralização dos ambientes e a percepção de um júri de avaliação.

- Avaliação dos ambientes com o sistema de ar condicionado ligado;
- Análise da posição dos espectadores / plateia com relação ao posicionamento dos materiais de revestimento.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, A. BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados**. Brasil, 1992.
- ALVES, E. V. **Estudo das condições acústicas de auditórios**. Universidade de Aveiro, Portugal, 2008.
- ARETZ, M.; ORLOWSKI, R. Sound strength and reverberation time in small concert halls. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 8, p. 1099–1110, ago. 2009.
- BARRON, M. **Auditorium acoustics and architectural design**. Second Ed. ed. New York: Spon Press, 2010.
- BASTOS, L. J. R. **Qualidade Acústica de Auditórios**. Portugal: Universidade de Aveiro, 2010.
- BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2^a edição ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.
- BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 107, n. 2, p. 861–875, 2000.
- BRADLEY, J. S. Predictors of speech intelligibility in rooms. **Journal of the Acoustical Society of America**, v. 80, n. September 1986, p. 837–845, 1986.
- BRAND, T. Speech Intelligibility. In: **Handbook of Signal Processing in Acoustics**. Oldenburg, Germany: Springer New York, 2008. p. 197–204.
- BURNETT, S. P. **Perceptual Worlds and Sensory Ecology**. Disponível em: <<http://goo.gl/0U9PNH>>.
- COWAN, J. Building Acoustics. In: THOMAS D. ROSSING PROF. (Ed.). **Springer Handbook of Acoustics**. New York: Springer New York, 2007. p. 387–425.
- CRAVERO, G. A. et al. **Análisis de parámetros acústicos de recintos para dos condiciones de ocupación : estudio de caso de un aula universitaria**. VIII Congreso Ibero-americano de Acústica. Anais...2014

CUSTÓDIO, M. F. **Qualidade Sonora através da Modelagem Numérica e Ensaios Experimentais no Centro de Convenções “Centro Sul” de Florianópolis-SC.** Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

DRAGONETTI, R.; IANNIELLO, C.; ROMANO, R. A. Reverberation time measurement by the product of two room impulse responses. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 1, p. 231–243, jan. 2009.

DREOSSI, R. C. F.; MOMENSOHN-SANTOS, T. O ruído e sua interferência sobre estudantes em uma sala de aula: revisão de literatura. **Pró-Fono Revista de Atualização Científica**, v. 17, n. 2, p. 251–258, 2005.

ELKHATEEB, A. A. The acoustical design of the new lecture auditorium, Faculty of Law, Ain Shams University. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 3, n. 3, p. 219–235, 2012.

EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustics**. Fourth ed. EUA: [s.n.].

FERREYRA, S. P. et al. **Análisis espacial del índice energético temprano-tardío en aulas universitarias.** VIII Congresso Ibero-americano de Acústica. **Anais...**2014

GADE, A. P. A. Acoustics in halls for speech and music. In: PROF., T. D. R. (Ed.). **Springer Handbook of Acoustics**. New York: Springer New York, 2007. p. 301–350.

HODGSON, M. Case-study evaluations of the acoustical designs of renovated university classrooms. **Applied Acoustics**, 2004.

HODGSON, M.; NOSAL, E.-M. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 111, n. 2, p. 931, 2002.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M. The modulation transfer function in room acoustics. In: **Technical Review**. [s.l.] Bruel & Kjaer, 1985. v. 3p. 3–12.

IEC, I. E. C. **IEC 60268-16: International Standard: Sound system equipment - Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index.** Suíça, 2011.

- INTERNACIONAL STANDARD. **ISO 3382-1:2009 - Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces**, 2009.
- ISBERT, A. C. **Diseño acústico de espacios arquitectónicos**. UPC ed.Barcelona: [s.n.].
- KITAPCI, K. et al. **Speech intelligibility in multilingual spaces**. Inter noise. **Anais...**Innsbruck, Austria: Inter noise, 2013
- KLATTE, M.; LACHMANN, T.; MEIS, M. Effects of noise and reverberation on speech perception and listening comprehension of children and adults in a classroom-like setting. **Noise & health**, v. 12, n. 49, p. 270–282, 2010.
- KNUDSEN, V. O. **Acoustical designing in architecture**. New York: J. Wiley, 1950.
- KUTTRUFF, H. **Room acoustics**. 5th editio ed. New York: Spon Press, 2009.
- LLINARES, J.; LLOPIS, A.; SANCHO, J. **Acustica arquitectonica y urbanistica**. Valencia: Universidad politecnica de Valencia, 1996.
- LONG, M. **Architectural Acoustics**. California, USA: Elsevier Academic Press, 2006.
- LOSSO, M. A. F. **Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: Avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- MANSILLA, J. et al. **Comparación de parámetros acústicos calculados mediante distintos Software**. IX Congreso Iberoamericano de Acústica - FIA. **Anais...**Valdivia, Chile: 2014
- MARCO, C. S. DE. **Elementos de acústica arquitetônica**. São Paulo: Nobel, 1982.
- MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural acoustics: principles and design**. New Jersey, EUA: Prentice-Hall, 1999.
- MORAES, E. M. L. et al. **Análise do Índice de Reconhecimento de Fala na Relação Sinal Ruído para o Ruído de Tráfego em Salas de Aula**. VIII Congresso Ibero-americano de Acústica. **Anais...**2014
- MULLER, S. Avaliação de inteligibilidade utilizando o STI. **Acústica e Vibrações**, n. 38, p. 25–38, 2007.

MÜLLER, S. **Medir o STI**. Campinas: 2005

RABELO, A. T. V. et al. **Modelo estatístico de predição da inteligibilidade de fala em salas de aula**. XXV Encontro SOBRAC. **Anais...**Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Acústica, 2014

ROCHA, R. R.; BRANDÃO, E. **Avaliação da inteligibilidade da fala através do STI: Implementação do método**. XXV Encontro SOBRAC. **Anais...**Campinas, SP: Sociedade Brasileira de Acústica, 2014

SERVÍN, I. T.; SÁNCHEZ, D.; ÁVILA, G. **Evaluación de la difusión acústica de recintos a partir de parámetros asociados a la reverberación**. VIII Congresso Ibero-americano de Acústica. **Anais...**2014

SILVA, C. M. F. **O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra - Caso de estudo: salas de aula da FEUP**. [s.l.] Universidade do Porto, Portugal, 2013.

SOLER, C. **Contribuição ao processo de projeto de auditórios: Avaliação e proposta de procedimento**. [s.l.] Universidade Estadual de Campinas, SP, 2004.

SOMMERHOFF, J.; ROSAS, C. **Relación entre los porcentajes de inteligibilidad de pruebas de articulación y valores de STI**. VIII Congresso Ibero-americano de Acústica. **Anais...**Évora, Portugal: 2012

STEENEKEN, H. J. M.; HOUTGAST, T. A physical method for measuring speech-transmission quality. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 67, n. 1, p. 318–326, 1980.

TANG, S. K. Speech related acoustical parameters in classrooms and their relationships. **Applied Acoustics**, v. 69, n. 12, p. 1318–1331, dez. 2008.

TRISTÁN, E.; PAVÓN, I.; LÓPEZ, J. M. **Influencia del ruido de fondo en ambientes universitarios sobre los procesos cognitivos básicos**. VIII Congresso Ibero-americano de Acústica. **Anais...**Évora, Portugal: 2012

VIVEIROS, E. B. **Acústica de salas e técnicas impulsivas**. III Encontro Nacional e I Encontro Latino-americano. **Anais...**Gramado: ENCAC, 1995

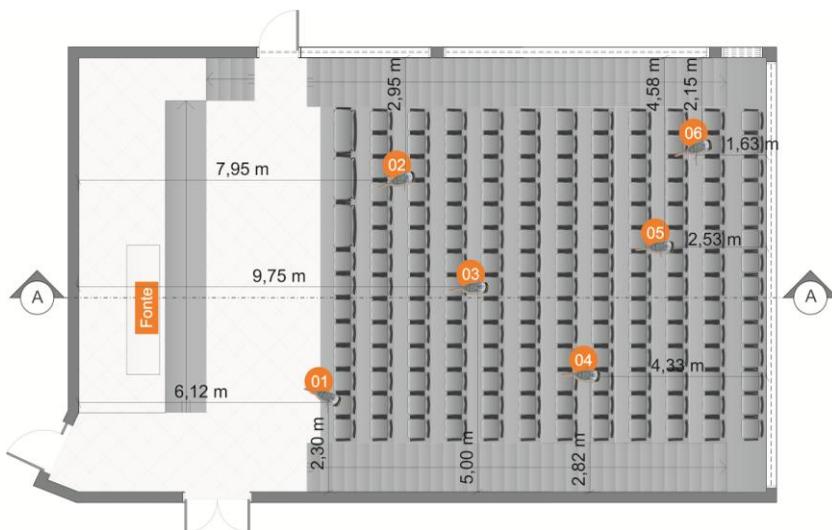
VORAN, S. Estimation of Speech Intelligibility and Quality. In: **Handbook of Signal Processing in Acoustics**. Springer New York, 2008. p. 483–520.

ZHU, P.; MO, F.; KANG, J. **Experimental comparison between direct and indirect measurement methods for the objective rating of speech intelligibility**. The 21 st International Congress on Sound and Vibration. **Anais...**Beijing, China: 2014

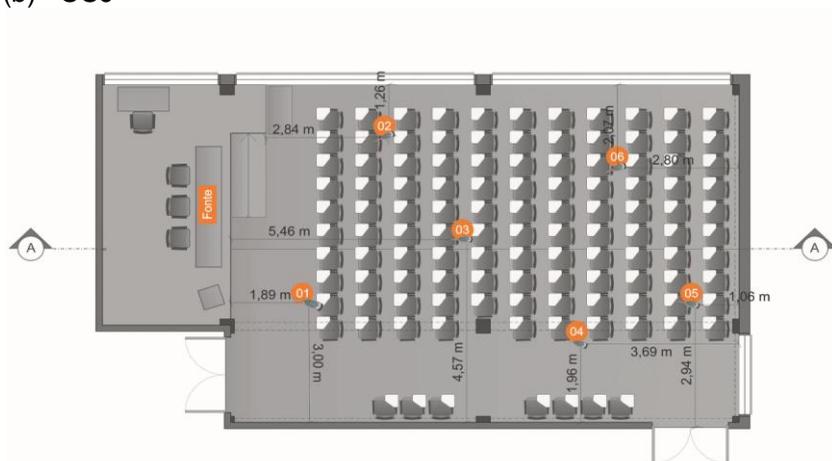
APÊNDICE

APÊNDICE A – PLANTA BAIXA DOS AUDITÓRIOS COM PONTOS DE FONTE E RECEPTORES.

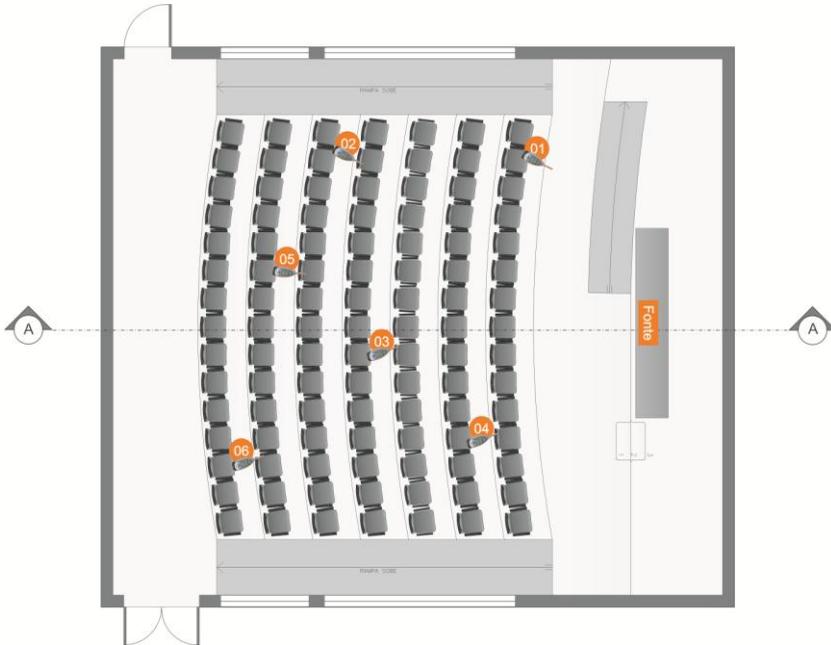
(a) CCS



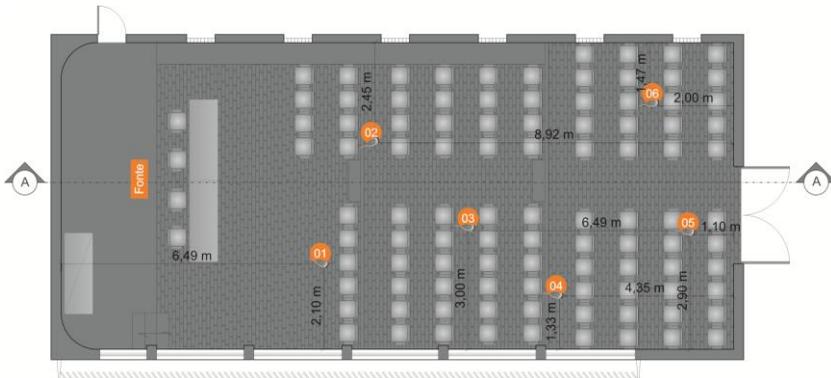
(b) CCJ



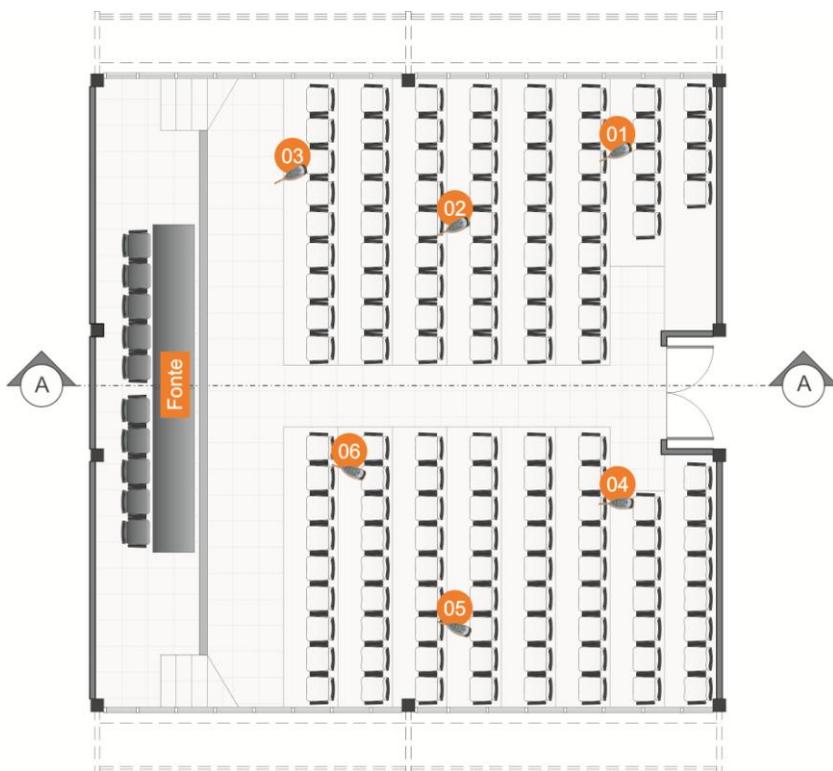
(c) CDS



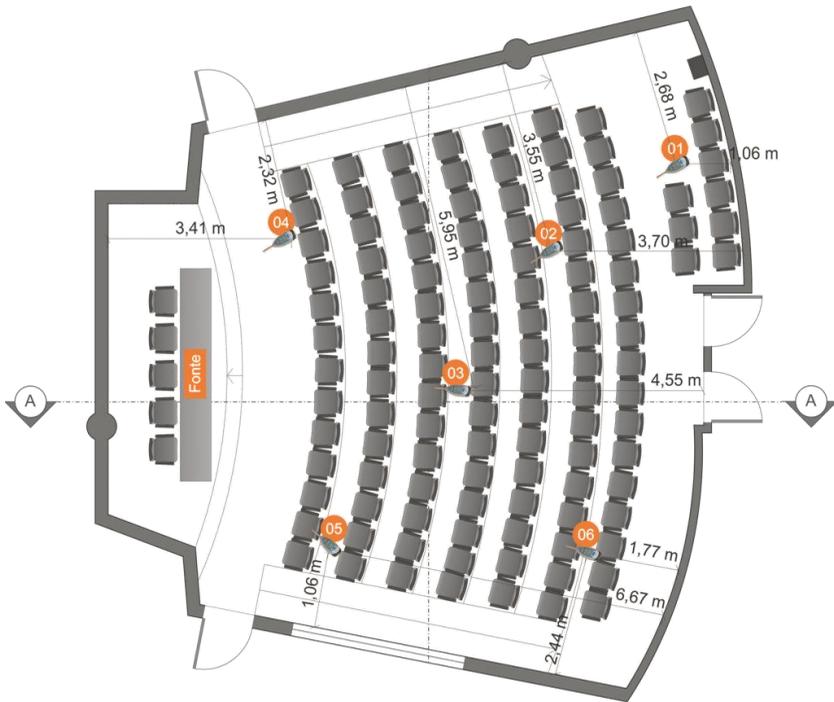
(d) CED



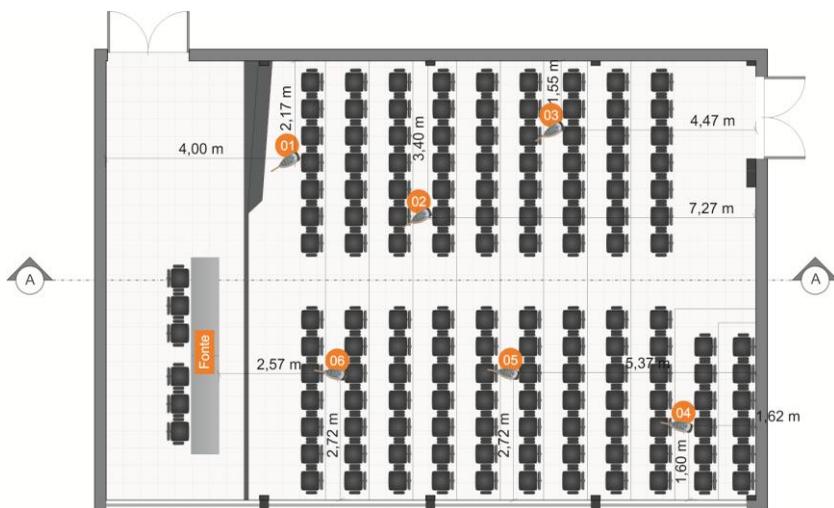
(e) CSE



(f) CTC-EP



(g)CTC-EE



APÊNDICE B – VALORES DE TR EXPERIMENTAL POR PONTOS DE MEDIÇÕES.

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CCE	125	2,8	3,2	3,1	3,3	2,9	2,9	3,0	0,2
	250	2,0	2,1	1,9	2,1	2,0	2,0	2,0	0,1
	500	1,3	1,2	1,3	1,3	1,3	1,4	1,3	0,1
	1 k	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,0
	2 k	1,2	1,4	1,2	1,3	1,3	1,3	1,3	0,1
	4 k	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	0,1
	8 k	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1	1,0	0,1
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
CCS	125	1,8	1,9	1,7	1,8	1,8	1,8	1,8	0,1
	250	1,6	1,8	1,6	1,7	1,5	1,6	1,6	0,1
	500	1,4	1,6	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	0,1
	1 k	1,6	1,7	1,8	1,7	1,7	1,6	1,7	0,1
	2 k	1,7	1,8	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	0,0
	4 k	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	1,4	0,0
	8 k	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
CCJ	125	1,9	2,0	2,0	2,1	2,3	2,0	2,1	0,1
	250	1,3	1,4	1,2	1,4	1,3	1,2	1,3	0,1
	500	0,7	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,0
	1 k	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,0
	2 k	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,0
	4 k	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,0
	8 k	0,4	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CDS	125	2,3	2,4	2,2	2,2	2,2	2,4	2,3	0,1
	250	1,5	1,6	1,5	1,5	1,6	1,5	1,5	0,1
	500	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
	1 k	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,0
	2 k	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0
	4 k	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0
	8 k	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1,0	0,9	0,0
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CED	125	1,4	1,3	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	0,1
	250	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1	0,0
	500	0,9	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9	0,9	0,0
	1 k	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,0
	2 k	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,8	0,8	0,0
	4 k	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,0
	8 k	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,0
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CSE	125	2,0	2,1	2,5	2,3	2,1	2,3	2,2	0,2
	250	1,3	1,6	1,4	1,4	1,3	1,5	1,4	0,1
	500	1,1	1,2	1,1	1,1	1,1	1,2	1,1	0,1
	1 k	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1	1,0	0,1
	2 k	1,2	1,2	1,1	1,0	1,1	1,3	1,1	0,1
	4 k	1,2	1,2	1,1	1,0	1,1	1,2	1,1	0,1
	8 k	1,2	1,0	1,0	0,9	1,0	1,1	1,0	0,1

APÊNDICE C – VALORES DE EDT POR PONTOS DE MEDIÇÕES PARA OS AUDITÓRIOS.

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CCE	125	4,2	4,9	4,3	4,8	3,7	2,7	4,1	0,8
	250	3,3	2,9	3,5	4,9	3,9	4,0	3,7	0,7
	500	2,5	3,7	2,4	4,3	3,9	3,6	3,4	0,8
	1 k	1,8	2,0	2,1	1,9	1,8	2,7	2,0	0,3
	2 k	1,7	1,9	1,5	2,1	2,3	2,1	1,9	0,3
	4 k	1,7	1,9	1,7	1,6	1,7	2,2	1,8	0,2
	8 k	1,4	1,4	1,1	1,1	1,7	1,8	1,4	0,3
CCS	125	3,6	1,4	1,3	2,3	1,5	2,4	2,1	0,9
	250	1,3	2,3	1,5	1,6	1,7	1,3	1,6	0,4
	500	1,3	1,6	1,5	2,1	1,5	1,5	1,6	0,3
	1 k	1,5	1,6	1,7	1,8	1,7	1,5	1,6	0,1
	2 k	1,4	1,6	1,7	1,6	1,7	1,8	1,6	0,1
	4 k	1,4	1,3	1,4	1,4	1,3	1,3	1,3	0,1
	8 k	0,8	0,8	0,9	0,8	0,8	0,9	0,8	0,1
CCJ	125	3,4	2,2	2,0	2,6	4,6	2,0	2,8	1,0
	250	1,1	1,2	1,0	1,6	2,0	1,3	1,4	0,4
	500	0,5	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,0
	1 k	0,6	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,1
	2 k	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,1
	4 k	0,4	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4	0,0
	8 k	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,0

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CDS	125	3,1	3,2	4,6	4,0	4,0	3,5	3,7	0,6
	250	3,8	4,0	3,0	2,2	3,2	2,1	3,0	0,8
	500	2,0	1,8	1,2	1,4	1,7	1,5	1,6	0,3
	1 k	1,8	1,9	1,6	1,4	1,2	1,3	1,5	0,3
	2 k	1,6	1,6	1,5	1,3	1,5	1,2	1,5	0,2
	4 k	1,4	1,7	1,3	1,2	1,3	1,3	1,4	0,1
	8 k	1,1	1,2	1,0	0,9	1,0	1,0	1,0	0,1
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
CED	125	2,4	1,8	2,3	2,3	1,8	2,0	2,1	0,3
	250	2,4	1,6	1,2	1,5	2,2	2,6	1,9	0,6
	500	1,5	1,2	1,4	1,2	1,1	0,9	1,2	0,2
	1 k	1,2	1,0	1,0	0,7	1,0	0,9	1,0	0,2
	2 k	1,0	1,1	1,5	1,2	1,3	1,2	1,2	0,2
	4 k	1,3	1,2	1,3	1,1	1,5	1,2	1,3	0,1
	8 k	0,9	1,0	1,1	0,9	1,1	1,0	1,0	0,1
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
CSE	125	3,5	2,8	5,5	4,6	5,7	4,8	4,5	1,1
	250	2,2	3,7	2,2	2,1	3,6	5,3	3,2	1,3
	500	1,7	1,5	1,9	2,4	2,3	1,6	1,9	0,4
	1 k	2,1	2,0	2,0	1,9	2,0	2,0	2,0	0,1
	2 k	2,2	2,1	2,2	2,3	2,0	1,7	2,1	0,2
	4 k	1,9	2,1	2,1	2,3	2,0	2,1	2,1	0,1
	8 k	1,6	1,5	1,5	1,7	1,7	1,8	1,6	0,1

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CTC -EP	125	4,2	7,2	9,0	5,0	7,0	6,9	6,6	1,7
	250	3,5	8,2	7,3	5,8	7,9	7,0	6,6	1,7
	500	4,0	2,9	2,5	3,6	4,1	3,8	3,5	0,6
	1 k	2,4	2,3	2,1	1,7	2,1	2,4	2,1	0,3
	2 k	2,1	2,2	2,1	2,5	2,0	2,7	2,3	0,3
	4 k	1,6	1,8	2,2	2,1	1,4	3,0	2,0	0,6
	8 k	1,4	1,9	1,5	1,8	1,2	1,5	1,5	0,3
	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [s]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CTC -EE	125	3,6	2,4	2,0	3,2	2,0	3,6	2,8	0,8
	250	2,5	2,3	1,7	1,4	3,3	2,3	2,3	0,7
	500	1,7	1,9	1,4	1,5	1,5	1,8	1,6	0,2
	1 k	1,5	1,1	1,6	1,3	1,4	1,6	1,4	0,2
	2 k	1,6	1,9	1,4	1,6	1,5	1,9	1,6	0,2
	4 k	2,0	1,8	1,6	1,6	1,8	2,0	1,8	0,2
	8 k	1,4	1,5	1,3	1,5	1,5	1,3	1,4	0,1

APÊNDICE D – VALORES DE DEFINIÇÃO (D_{50}) POR PONTOS DE MEDIÇÕES PARA OS AUDITÓRIOS.

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [%]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CCE	125	3,1	3,5	1,8	2,2	3,3	3,4	2,9	0,7
	250	8,9	4,0	10,0	7,1	3,1	6,2	6,6	2,7
	500	21,1	15,0	22,2	21,6	16,9	15,9	18,8	3,2
	1 k	21,3	22,5	28,4	29,9	16,6	20,7	23,2	5,0
	2 k	21,8	21,6	22,7	26,1	26,1	23,8	23,7	2,0
	4 k	28,8	26,5	33,3	28,7	27,7	22,8	28,0	3,4
	8 k	38,9	37,3	42,8	38,4	39,0	34,8	38,5	2,6
CCS	125	48,3	29,4	59,7	33,2	30,9	41,8	40,5	11,8
	250	55,4	47,0	42,5	19,9	30,8	43,1	39,8	12,6
	500	41,6	39,2	34,5	34,3	38,3	46,3	39,1	4,5
	1 k	39,0	34,7	35,9	22,4	36,9	34,4	33,9	5,8
	2 k	33,5	32,9	33,9	27,7	38,4	36,3	33,8	3,6
	4 k	43,9	36,5	41,8	35,0	47,5	44,3	41,5	4,8
	8 k	59,5	56,1	60,6	44,7	63,1	59,9	57,3	6,6
CCJ	125	17,6	18,0	17,0	33,3	27,5	35,0	24,7	8,3
	250	42,1	34,3	45,4	50,7	48,0	32,6	42,2	7,4
	500	71,8	62,2	67,3	65,6	71,9	56,3	65,8	6,0
	1 k	70,8	62,1	64,1	61,9	62,1	66,6	64,6	3,5
	2 k	76,7	69,2	71,0	75,2	76,6	70,6	73,2	3,3
	4 k	84,5	82,4	78,7	78,6	82,9	79,7	81,1	2,5
	8 k	90,3	90,1	87,6	86,9	89,1	88,1	88,7	1,4
CDS	125	7,9	13,7	17,6	9,5	15,8	22,4	14,5	5,4
	250	12,3	19,5	23,3	18,6	32,3	24,5	21,8	6,7
	500	37,1	27,0	37,2	38,7	35,4	36,0	35,2	4,2
	1 k	31,8	32,7	34,5	38,5	32,5	32,3	33,7	2,5
	2 k	30,9	23,4	34,6	33,9	32,0	32,7	31,3	4,1
	4 k	34,7	27,5	39,5	37,6	35,1	36,9	35,2	4,1
	8 k	43,8	39,9	50,8	51,6	50,1	48,1	47,4	4,6

CED	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [%]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	18,9	20,1	22,8	16,1	15,3	24,2	19,6	3,5
	250	32,3	32,2	22,0	17,0	26,1	30,3	26,6	6,2
	500	31,8	39,1	35,7	35,4	34,8	38,9	35,9	2,8
	1 k	36,3	39,5	38,6	44,6	41,1	45,3	40,9	3,5
	2 k	29,4	36,7	36,1	43,3	38,0	36,1	36,6	4,5
	4 k	34,8	35,6	31,1	44,5	36,2	34,3	36,1	4,5
8 k	42,6	50,6	46,4	54,1	47,0	49,8	48,4	4,0	
CSE	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [%]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	6,5	4,2	2,8	10,0	6,2	2,8	5,4	2,7
	250	15,3	12,5	10,8	15,4	15,4	15,9	14,2	2,1
	500	19,4	21,2	20,2	16,8	19,1	23,8	20,1	2,3
	1 k	30,4	27,2	22,5	25,2	24,6	25,0	25,8	2,7
	2 k	26,2	23,6	24,2	21,0	21,9	18,4	22,6	2,7
	4 k	26,9	26,1	23,6	18,9	22,2	19,7	22,9	3,3
8 k	31,3	33,3	33,6	24,1	31,0	28,6	30,3	3,5	
CTC -EP	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [%]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	3,9	2,2	2,8	2,6	1,9	2,4	2,6	0,7
	250	9,3	8,0	6,6	2,3	5,7	3,7	5,9	2,6
	500	13,3	9,6	14,2	10,7	15,3	13,4	12,8	2,2
	1 k	20,6	17,6	17,2	22,4	24,2	25,2	21,2	3,3
	2 k	18,2	17,5	18,0	19,8	18,1	19,5	18,5	0,9
	4 k	22,7	20,6	19,8	22,5	21,5	23,1	21,7	1,3
8 k	29,0	26,8	26,7	31,3	27,9	28,8	28,4	1,7	
CTC -EE	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [%]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	9,7	4,7	14,3	16,9	13,8	13,4	12,1	4,3
	250	29,8	47,6	33,3	33,1	45,1	28,5	36,2	8,1
	500	30,8	31,6	25,8	25,6	35,2	31,7	30,1	3,7
	1 k	30,5	34,9	32,5	39,2	30,1	32,1	33,2	3,4
	2 k	25,8	25,2	22,5	26,3	24,1	28,9	25,4	2,2
	4 k	27,1	24,0	24,7	27,9	24,9	31,3	26,7	2,7
8 k	40,2	35,4	35,6	36,5	36,5	43,5	37,9	3,2	

APÊNDICE E – VALORES DE C_{80} PARA OS PONTOS DE MEDIÇÃO PARA OS AUDITÓRIOS.

	Frequência [Hz]	Pontos de medições						Média [dB]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
CCE	125	-12,6	-11,7	-12,6	-13,1	-11,6	-13,0	-12,4	0,6
	250	-8,1	-11,3	-8,0	-9,4	-10,4	-9,1	-9,4	1,3
	500	-2,9	-5,1	-2,7	-4,0	-5,4	-5,0	-4,2	1,2
	1 k	-2,9	-3,2	-1,6	-1,9	-4,4	-3,3	-2,9	1,0
	2 k	-3,0	-2,5	-2,2	-2,7	-2,3	-3,3	-2,7	0,4
	4 k	-1,6	-1,7	-0,1	-1,7	-1,7	-2,7	-1,6	0,8
	8 k	0,8	0,5	1,8	0,2	0,9	-0,1	0,7	0,6
CCS	125	1,4	-2,8	3,4	-1,4	-1,8	0,7	-0,1	2,3
	250	2,4	1,7	1,8	-3,7	-1,6	1,6	0,4	2,4
	500	1,7	1,4	0,7	-1,3	0,2	1,9	0,8	1,2
	1 k	0,9	-0,2	-0,7	-2,4	0,1	0,2	-0,4	1,1
	2 k	0,5	0,0	-0,3	-1,9	0,3	0,0	-0,2	0,9
	4 k	1,6	0,9	1,2	-0,6	2,1	1,2	1,1	0,9
	8 k	4,9	4,3	4,7	2,1	5,2	4,3	4,3	1,1
CCJ	125	-2,2	-4,2	-3,6	-1,6	-2,5	0,5	-2,3	1,6
	250	1,7	0,1	2,4	2,5	2,6	-0,4	1,5	1,3
	500	8,7	7,5	7,1	6,7	8,4	5,8	7,4	1,1
	1 k	7,4	6,3	7,5	6,1	6,3	7,5	6,8	0,7
	2 k	9,6	8,3	8,5	8,8	9,0	7,8	8,7	0,6
	4 k	12,6	11,2	10,2	10,1	10,8	9,7	10,8	1,0
	8 k	15,3	13,8	13,1	13,0	12,8	12,0	13,3	1,1
CDS	125	-7,2	-6,5	-3,6	-7,1	-4,1	-4,9	-5,6	1,6
	250	-5,5	-4,8	-3,9	-4,1	-1,8	-1,1	-3,5	1,7
	500	0,0	-1,0	0,2	0,2	-0,5	1,5	0,1	0,9
	1 k	-0,4	-0,6	-0,2	0,5	-0,2	0,6	0,0	0,5
	2 k	-1,0	-1,7	0,7	0,1	-0,6	-0,3	-0,5	0,8
	4 k	0,1	-0,6	1,5	0,7	0,3	0,5	0,4	0,7
	8 k	2,2	1,5	3,4	3,4	3,0	2,9	2,7	0,7

CED	Freqüência [Hz]	Pontos de medições						Média [dB]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	-4,3	-3,6	-3,9	-4,0	-3,0	-2,3	-3,5	0,7
	250	-2,0	0,0	-3,3	0,4	-1,7	-1,0	-1,3	1,4
	500	-0,8	1,0	0,4	0,2	0,9	1,2	0,5	0,7
	1 k	-0,1	1,0	1,4	2,0	1,5	2,2	1,4	0,8
	2 k	-0,5	0,8	0,3	1,8	0,3	0,4	0,5	0,8
	4 k	-0,3	1,1	0,0	1,9	0,5	0,4	0,6	0,8
8 k	1,3	3,4	2,5	3,6	2,3	3,3	2,7	0,9	
CSE	Freqüência [Hz]	Pontos de medições						Média [dB]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	-7,4	-10,6	-11,5	-7,8	-9,7	-11,0	-9,7	1,7
	250	-5,3	-4,3	-6,8	-4,0	-5,0	-5,5	-5,2	1,0
	500	-3,0	-2,7	-3,9	-4,5	-3,6	-3,2	-3,5	0,7
	1 k	-1,3	-2,0	-1,4	-2,2	-2,2	-2,1	-1,9	0,4
	2 k	-2,0	-2,3	-2,2	-3,0	-2,4	-3,7	-2,6	0,6
	4 k	-1,6	-2,1	-2,6	-3,4	-2,8	-3,3	-2,6	0,7
8 k	-0,4	-0,2	-0,3	-1,8	-0,5	-1,2	-0,7	0,6	
CTC -EP	Freqüência [Hz]	Pontos de medições						Média [dB]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	-12,3	-12,6	-14,1	-12,5	-15,4	-14,1	-13,5	1,2
	250	-8,2	-9,5	-8,3	-11,8	-10,7	-11,9	-10,1	1,6
	500	-5,6	-7,4	-5,4	-7,5	-5,6	-6,2	-6,3	0,9
	1 k	-3,7	-3,8	-3,7	-3,4	-2,6	-2,4	-3,3	0,6
	2 k	-3,3	-4,5	-3,7	-3,8	-3,3	-3,0	-3,6	0,5
	4 k	-2,4	-3,7	-3,7	-3,1	-2,4	-2,1	-2,9	0,7
8 k	-0,6	-2,0	-1,9	-1,2	-0,9	-0,7	-1,2	0,6	
CTC -EE	Freqüência [Hz]	Pontos de medições						Média [dB]	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5	6		
	125	-8,2	-6,8	-3,2	-5,0	-5,5	-5,5	-5,7	1,7
	250	-2,0	1,0	-0,5	0,7	0,3	-2,2	-0,5	1,4
	500	-1,7	0,1	-1,6	-0,5	0,7	-0,8	-0,6	0,9
	1 k	-1,0	-0,5	0,0	0,7	-0,6	0,0	-0,2	0,6
	2 k	-1,9	-2,1	-2,0	-1,4	-2,2	-1,1	-1,8	0,4
	4 k	-2,1	-2,1	-2,3	-1,2	-2,0	-0,9	-1,8	0,6
8 k	0,9	0,2	0,1	0,6	0,2	1,3	0,6	0,5	