

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JÚLIO OTÁVIO HERRMANN

MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES DE ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA (STI),
DEFINIÇÃO (D_{50}) E TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_R) EM SALAS DE AULA

CURITIBA

2018

JÚLIO OTÁVIO HERRMANN

MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES DE ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA (STI),
DEFINIÇÃO (D_{50}) E TEMPO DE REVERBERAÇÃO (T_R) EM SALAS DE AULA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Titular Dr. -Ing. Paulo H. T. Zannin

CURITIBA

2018

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

H568m Herrmann, Júlio Otávio

Medições e simulações de índice de transmissão de fala (STI), definição (D₅₀) e tempo de reverberação (Tr) em salas de aula / Júlio Otávio Herrmann–Curitiba, 2018.

117p. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2018.

Orientador: Paulo Henrique Trombeta Zannin

Bibliografia: p. 92-96.

1. Acústica – Salas de aula. 2. Odeon (*Software*). I. Universidade Federal do Paraná. II. Zannin, Paulo Henrique Trombeta. III. Título.

CDD: 620.2

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
AMBIENTAL

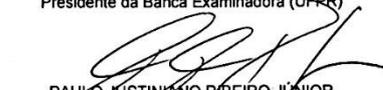
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JULIO OTAVIO HERRMANN** intitulada: **Medições e simulações de índice de transmissão de fala (STI), definição (D50) e tempo de reverberação (TR) em salas de aula**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 17 de Maio de 2018.


PAULO HENRIQUE TROMBETTA ZANNIN
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


PAULO JUSTINIANO RIBEIRO JÚNIOR
Avaliador Interno (UFPR)


ANDRESSA MARIA COELHO FERREIRA
Avaliador Externo (ADESSO)

Aos meus pais,
Manfred Bodo Herrmann (1939 a 2018) e
Ana Cristina Herrmann (1946 a 2017).

AGRADECIMENTOS

Agradeço por ter vindo ao mundo por meio de pessoas tão maravilhosas, íntegras, dignas, honestas e amorosas; meus pais Manfred e Ana Cristina.

Ao meu pai, Manfred, pelo apoio e paciência.

Ao Prof. Titular Dr. Ing. Paulo H. T. Zannin, por compartilhar seu tempo, conhecimento, pela confiança, pelo apoio e pelo incentivo.

Aos amigos Caroline Amorim, Daniel Souza e Thomas Jeferson Vieira, pela parceria, trabalho, auxílio e descontração.

A todos os meus colegas do LAAICA, por proporcionarem um ambiente de trabalho leve e descontraído, pelo compartilhamento de seus conhecimentos, pelo auxílio e pelos finais de semana de medições e trabalho. Em especial, ao Matheus Parisotto que me auxiliou com as simulações em ODEON.

Ao secretário do PPGEA, Leonildo Alves Leal, pelo sempre pronto atendimento e auxílio com as questões burocráticas.

A bolsa de estudos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PPGEA, cedida pela coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES.

A ótima infraestrutura do Laboratório de Acústica Ambiental, Industrial e Conforto Acústico – LAAICA.

"Que a felicidade não dependa do tempo, nem da paisagem, nem da sorte, nem do dinheiro. Que ela possa vir com toda simplicidade, de dentro para fora, de cada um para todos. Que as pessoas saibam falar, calar, e acima de tudo ouvir. Que tenham amor ou então sintam falta de não tê-lo. Que tenham ideal e medo de perdê-lo. Que amem ao próximo e respeitem sua dor, para que tenhamos certeza de que: 'Ser feliz sem motivo é a mais autêntica forma de felicidade'"

Carlos Drummond de Andrade

RESUMO

A qualidade acústica das salas de aula tem forte influência no aprendizado, esta interferência foi avaliada usando a técnica impulsiva para medir o índice de transmissão de fala (STI), tempo de reverberação (T_R) e definição D_{50} , por serem os indicadores acústicos mais relevantes na avaliação de salas de aula, onde a exposição verbal é o meio de comunicação entre professores e alunos. A avaliação ocorreu em dois prédios da Universidade Federal do Paraná (UFPR) edificados um da década de 1960 e outro em 2016. Os valores medidos de STI além de fornecer a real condição acústica das salas, foram usados como parâmetro de ajuste para simulações feitas com o *software* ODEON. Após as medições foram realizadas simulações a fim de dimensionar quais e que tipo de melhoria podem requalificar as salas de aula na UFPR para que não haja prejuízo na aprendizagem em função da estrutura física onde ocorrem as aulas. Os valores de STI, T_R e D_{50} medidos mostram que no prédio mais antigo, salvo uma única sala que preserva o teto original, acústico, tem valores razoáveis, ou seja, ficam aquém do ideal para aulas, segundo a norma IEC 60268-16 (2011). Pode-se constatar que as salas que tiveram com o passar do tempo o teto acústico trocado por PVC, tiveram uma queda na qualidade acústica. O prédio mais novo construído em 2016 tem salas com boas condições acústicas para ensino aprendizagem. Foi constatado também uma concordância na interpretação dos dados de STI, T_R e D_{50} quando comparados os valores qualitativos das normas IEC 60268-16 (2011) para o STI, de FASOLD (2003) para o D_{50} e ANSI/ASA para T_R .

Palavras-chave: STI – Índice de transmissão de fala. *Software* Odeon. T_R – Tempo de reverberação. Definição D_{50} .

ABSTRACT

Using an impulsive technique, the speech transmission index (STI), reverberation time (T_R), and D_{50} were measured, which are the most relevant acoustic descriptors for classroom evaluation, where verbal exposure is the mean of communication between teachers and students. The evaluation took place in two buildings of the Federal University of Paraná (UFPR), one built in 1960s and the other in 2016. Besides providing the real acoustic condition of the rooms, the STI values were also used as an adjustment parameter for computational simulations with ODEON software. In a second fase, new simulations were made in order to determine which and what kind of improvement can requalify the classrooms at UFPR so that there is no demerit in the learning due to the physical structure where the lessons take place. The measured values of STI, T_R and D_{50} show that in the oldest building, except for a single room that still preserves the original acoustic ceiling, has reasonable values, meaning that it is not ideal for lessons. It was possible to verify that the rooms which over time had their acoustic ceiling changed by PVC, presented a decrease in acoustic quality. The newest building built in 2016 has rooms with good acoustic conditions for teaching and learning. It was also noticed a congruence in the interpretation of STI, T_R and D_{50} data when comparing the qualitative values of ISO ISO 9921:2003 for STI, from FASOLD (2003) to D_{50} and ANSI/ASA for T_R .

Keywords: STI – Speech transmission index. Odeon. T_R – Reverberation time. Definition D_{50} .

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.....	20
FIGURA 2 - ABSORÇÃO SONORA E INTERAÇÃO ENTRE ONDA E PAREDE	22
FIGURA 3 - SOM DIRETO E REFLETIDO.....	23
FIGURA 4 - CLARIDADE C_{50}	28
FIGURA 5 - DEFINIÇÃO DE SOM, D_{50}	29
FIGURA 6 - RELAÇÃO PROPOSTA ENTRE ESCALAS DE A_1 , C_{50} E C_{80}	29
FIGURA 7 - MODULAÇÃO DE STI.....	32
FIGURA 8 - MATRIZ COM VALORES DE MEDIÇÃO DE STI.....	33
FIGURA 9 – ESCALA DE VALORES QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS E RELAÇÃO DE CORES USADAS NAS SIMULAÇÕES EM ODEON.....	34
FIGURA 10 – SALAS DE AULA.....	41
FIGURA 11 – ARRANJO DOS EQUIPAMENTOS PARA MEDIR STI: COMPUTADOR, INTERFACE DE AUDIO, EQUALIZADOR AMPLIFICADOR, BOCA ARTIFICIAL E MEDIDOR DE PRESSÃO SONORA.....	42
FIGURA 13 – BOCA ARTIFICIAL BK 4227.....	43
FIGURA 14 – CAIXA DE COMANDO DO DIRAC 3.1 AJUSTADA PARA LEITURA DO STI.....	44
FIGURA 15 – FONTE SONORA DODECAÉDRICA.....	45
FIGURA 16 – ARRANJO DOS EQUIPAMENTOS PARA MEDIR TR: COMPUTADOR, INTERFACE DE AUDIO, AMPLIFICADOR, FONTE DODECAÉDRICA E MEDIDOR DE PRESSÃO SONORA.....	46
FIGURA 17 - CAIXA DE COMANDO DO DIRAC 5.0 PARA MEDIR TR.....	46
FIGURA 18 – CROQUI DA SALA PG 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS.....	50
FIGURA 19 – MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG03 COM TETO DE PVC.....	51
FIGURA 20 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG03 COM TETO ACÚSTICO.....	51
FIGURA 21 - CROQUI DA SALA PG 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS.....	52
FIGURA 22 - CROQUI DA SALA PG 04 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS.....	54

FIGURA 23 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG04 COM TETO DE PVC	55
FIGURA 24 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG04 COM TETO ACUSTICO	55
FIGURA 25 - CROQUI DA SALA PG 04 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	56
FIGURA 26 – CROQUI DA SALA PG 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS	58
FIGURA 27 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG05 COM TETO ACUSTICO	58
FIGURA 28 – CROQUI DA SALA PG 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	59
FIGURA 29 – CROQUI DA SALA PG 06 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	61
FIGURA 30 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG06 COM TETO DE PVC	61
FIGURA 31 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG06 COM TETO ACÚSTICO	62
FIGURA 32 - CROQUI DA SALA PG 06 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	62
FIGURA 33 – CROQUI DA SALA PG 07 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	64
FIGURA 34 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG07 COM TETO DE PVC	65
FIGURA 35 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG07 COM TETO ACÚSTICO	65
FIGURA 36 - CROQUI DA SALA PG 07 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	66
FIGURA 37 – CROQUI DA SALA PG 15 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	68
FIGURA 38 – MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA NA SALA PG15 COM TETO DE PVC	68
FIGURA 39 – MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PG15 COM TETO ACÚSTICO	69

FIGURA 40 – CROQUI DA SALA PG 15 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	69
FIGURA 41 - CROQUI DA SALA PA 01 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	72
FIGURA 42 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PA01	72
FIGURA 43 - CROQUI DA SALA PA 01 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	73
FIGURA 44 - CROQUI DA SALA PA 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	74
FIGURA 45 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PA03	75
FIGURA 46 - CROQUI DA SALA PA 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	76
FIGURA 47 - CROQUI DA SALA PA 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	77
FIGURA 48 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PA05	78
FIGURA 49 - CROQUI DA SALA PA 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	78
FIGURA 50 - CROQUI DA SALA PA06 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	80
FIGURA 51 - MODELAGEM DE STI NO <i>SOFTWARE</i> ODEON DA SALA PA06	81
FIGURA 52 - CROQUI DA SALA PA 06 COM OS VALORES MEDIDOS DE D ₅₀ EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - TEMPOS DE REVERBERAÇÃO RECOMENDADOS PARA SALAS DE AULA EM DIFERENTES PAÍSES	26
TABELA 2 – DIMENSÕES DAS SALAS DE AULA:	47
TABELA 3 - VALORES DE ABSORÇÃO DOS FORROS ANTIGO (CELOTEX M1) E NOVO (PVC).....	49
TABELA 4 - VALORES DE ABSORÇÃO DO TETO ACUSTICO THERMATEX STAR SK	71
TABELA 5 - VALORES MEDIOS DE STI SIMULADO E MEDIDO E ERRO RELATIVO.....	84
TABELA 6 -COMPARAÇÃO DE VALORES STI QUANTITATIVO E QUALITATIVO	86
TABELA 7 – COMPARATIVO ENTRE VALORES QUALITATIVOS DE D_{50}	87
TABELA 8 - VALORES MEDIDOS (QUANTITATIVOS) E RELAÇÃO COM VALORES QUALITATIVOS DE STI, D_{50} E T_R	89

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - TEMPO DE REVERBERAÇÃO ÓTIMO PARA VARIOS USOS DE AMBIENTES.....	26
GRÁFICO 2 -TEMPO DE REVERBERAÇÃO ÓTIMO PARA FREQUÊNCIA DE 500 Hz.....	27
GRÁFICO 3 - QUALIFICAÇÃO DO STI E RELAÇÃO COM MEDIDAS DE INTELIGIBILIDADE SUBJETIVAS	35
GRÁFICO 4 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG03	53
GRÁFICO 5 -VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG03	53
GRÁFICO 6 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG04	56
GRÁFICO 7 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG04	57
GRÁFICO 8 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG05	60
GRÁFICO 9 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG05	60
GRÁFICO 10 - VALORES DE D_{50} FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG06	63
GRÁFICO 11 - VALORES DE T30 FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG06	63
GRÁFICO 12 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG07	67
GRÁFICO 13 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG07	67
GRÁFICO 14 VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG15	70
GRÁFICO 15 – VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG15	70
GRÁFICO 16 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA 01	73

GRÁFICO 17 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA01	74
GRÁFICO 18 - VALORES DE D ₅₀ POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA03	76
GRÁFICO 19 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA03	77
GRÁFICO 20 - VALORES DE D ₅₀ POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA 05	79
GRÁFICO 21 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA05	80
GRÁFICO 22 - VALORES DE D ₅₀ POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA 06	82
GRÁFICO 23 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA06	83
GRÁFICO 24 – STI MÉDIO MEDIDO E STI MÉDIO SIMULADO DAS SALAS	85
GRÁFICO 25 – VALORES DE T _R POR FREQUÊNCIA NAS SALAS DE AULA.....	87
GRÁFICO 26 – VALORES DE D ₅₀ POR FREQUÊNCIA NAS SALAS DE AULA.....	88

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral.....	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	NÍVEL DE PRESSÃO SONORA.....	19
2.2	RUÍDO DE FUNDO	21
2.3	ABSORÇÃO SONORA.....	21
2.4	TEMPO DE REVERBERAÇÃO	23
2.5	CLARIDADE E DEFINIÇÃO	28
2.6	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA (STI).....	30
3	REVISÃO DA LITERATURA	36
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	LEVANTAMENTOS DE DADOS	40
4.2	MEDIÇÕES DO STI.....	41
4.3	MEDIÇÕES DO T_R E D_{50}	45
4.4	MODELAGENS NO <i>SOFTWARE ODEON 11.00 COMBINED</i>	47
5	RESULTADOS	49
5.1	SALAS DE AULA DO PRÉDIO ANTIGO DO CENTRO POLITÉCNICO	49
5.1.1	Sala PG03	49
5.1.2	Sala PG04	53
5.1.3	Sala PG05	57
5.1.4	Sala PG06	60
5.1.5	Sala PG07	64
5.1.6	Sala PG15	67
5.2	SALAS DO PREDIO DE EXATAS: PA01, PA03, PA05, PA06	71
5.2.1	Sala PA 01.....	71
5.2.2	Sala PA 03.....	74
5.2.3	Sala PA05.....	77
5.2.4	Sala PA06.....	80
6	DISCUSSÃO	84
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	90

REFERÊNCIAS.....	92
ANEXO A – CALCULO DE DESVIO PADRAO E ERRO RELATIVO.....	97
APÊNDICE A – TABELAS CONTENDO OS VALORES DE MEDIÇÃO, DE SIMULAÇÃO E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO E ERRO RELATIVO DAS SALAS	98
APÊNDICE B – TABELAS CONTENDO OS VALORES DE MEDIÇÃO DE D_{50} E AS MÉDIAS POR FREQUENCIA E POR PONTO	104
APÊNDICE C – TABELAS CONTENDO OS VALORES DE MEDIÇÃO DE T30 E AS MÉDIAS POR FREQUENCIA E POR PONTO	107
APÊNDICE D – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO NAS SALAS DE AULA.....	110
APÊNDICE E – TABELA CONTENDO O RUÍDO DE FUNDO MEDIDO NAS SALAS E USADO PARA AS SIMULAÇÕES	116
APÊNDICE F – ESQUEMA PARA MEDIÇÃO DE STI.....	117

1 INTRODUÇÃO

O processo de aprendizagem depende de diversos elementos como professor, aluno, material didático, ambiente, clima, entre outros. As instituições de ensino devem oferecer espaços físicos propícios ao desenvolvimento das atividades. A qualidade acústica do local de ensino é uma das variáveis que influencia fortemente no aprendizado dos alunos. Condições acústicas desfavoráveis tornam o aprendizado exaustivo (HAGEN et al., 2002).

A fala consiste em uma sucessão de sons que variam rapidamente a cada instante em intensidade e frequência (FRENCH; STEINBERG, 1947). Sala e Rantala (2016) descrevem que a percepção da fala depende da intensidade, que por sua vez depende da produção da fala, da localização do orador, da distância entre um orador e ouvinte, da acústica da sala e da presença de ruído durante a fala.

A inteligibilidade da fala é descrita por Long (2006, p. 93-94) como um método de medição direta do entendimento da fração de palavras ou sentenças por um ouvinte. Hongisto, Keranen e Larm (2004) descrevem duas formas principais de calcular a inteligibilidade da fala. O método audiológico, descrito na norma do *American National Standards Institute (ANSI) S3.5* de 1997, gera o índice de inteligibilidade da fala (SII) ou índice de articulação (AI). Já o método de função de transferência de modulação (MTF), descrito na norma IEC 60268-16:2011, gera o índice de transmissão da fala (STI).

Segundo Lazarus et al. (2007) o STI é um dos parâmetros de inteligibilidade de fala mais abrangente e importante. O índice leva em consideração a maioria das condições que podem causar deterioração da inteligibilidade da fala, tais como tempo de reverberação e ruído de fundo.

Nesta linha insere-se o presente trabalho, que busca analisar a qualidade acústica com que o discurso dos professores chega aos alunos, ou seja, verificar a inteligibilidade de fala vinculada às salas de aula através dos métodos impulsivos STI, T_R e D_{50} . Nos casos onde foi observada uma baixa inteligibilidade, simulações com mudança de material são propostas para corrigir o ambiente no quesito acústico.

1.1 OBJETIVOS

Verificar a qualidade acústica de salas de aula por meio da inteligibilidade da fala, um objetivo geral e alguns objetivos específicos são propostos, conforme apresentado a seguir.

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é avaliar as condições de inteligibilidade da fala de salas de aula em dois prédios da Universidade Federal do Paraná (UFPR); um edificado em 1960 e o outro em 2016. Para esta avaliação foram realizadas medições e simulações do STI, e medições de tempo de reverberação e definição de som (D_{50}). O método proposto é orientado pela IEC 60268-16:2011 e pela ISO 3382:1-2009 e utiliza os *softwares* DIRAC nas medições de STI e ODEON para engenhar as simulações.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são traçados:

- a) Caracterização das salas de aula;
- b) Medição STI, T_R e D_{50} nas salas de aula usando método impulsivo conforme a IEC 60268-16:2011 e a ISO 3382:1-2009;
- c) Simulação da acústica das salas de aula avaliadas;
- d) Tabulação dos dados medidos para conferência;
- e) Avaliação e classificação das salas de aula analisadas;
- f) Recomendação de alternativas visando a melhoria dos parâmetros avaliados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir serão apresentados alguns conceitos importantes para a pesquisa desenvolvida.

2.1 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

Harris (1998) define o som como um distúrbio físico em um meio (gás, líquido ou sólido) que é capaz de ser detectado pelo ouvido humano, e também define como a sensação auditiva excitada por um distúrbio físico em um meio.

Já para Bistafa (2011) sons são vibrações das moléculas do ar que se propagam a partir de estruturas vibrantes, mas nem toda estrutura que vibra gera som”. Som é a sensação produzida no sistema auditivo; e ruído é um som sem harmonia, em geral de conotação negativa.

Para Silva (1997), a pressão mínima audível ou que nosso ouvido pode captar é da ordem de $P = 20 \times 10^{-5}$ Pascal (Pa), chamada também de mínima de referência. Ainda, a unidade que usualmente mede níveis de intensidade ou de pressão sonora é chamada de “decibel” (dB).

A equação matemática que indica o nível de pressão sonora (NPS), segundo (REYNOLDS 1985):

$$NPS = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} [dB]$$

Onde:

p : pressão sonora no local de medição (Pa ou $\frac{N}{m^2}$);

p_0 : pressão sonora de referência (ou mínima audível) (20 μ Pa).

Na Figura 1 apresenta a relação entre pressão sonora (μ Pa) e nível de pressão sonora (dB) em diferentes situações de ruído.

Para poder somar níveis de pressão sonora, deve-se levar em conta que se estão somando funções logarítmicas e não números decimais conforme descreveremos abaixo:

$$NPS = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} [dB]$$

Então, isolando p^2 temos:

$$p^2 = p_0^2 10^{0.1NPS} [dB]$$

Quando queremos somar vários níveis de pressão sonora teremos:

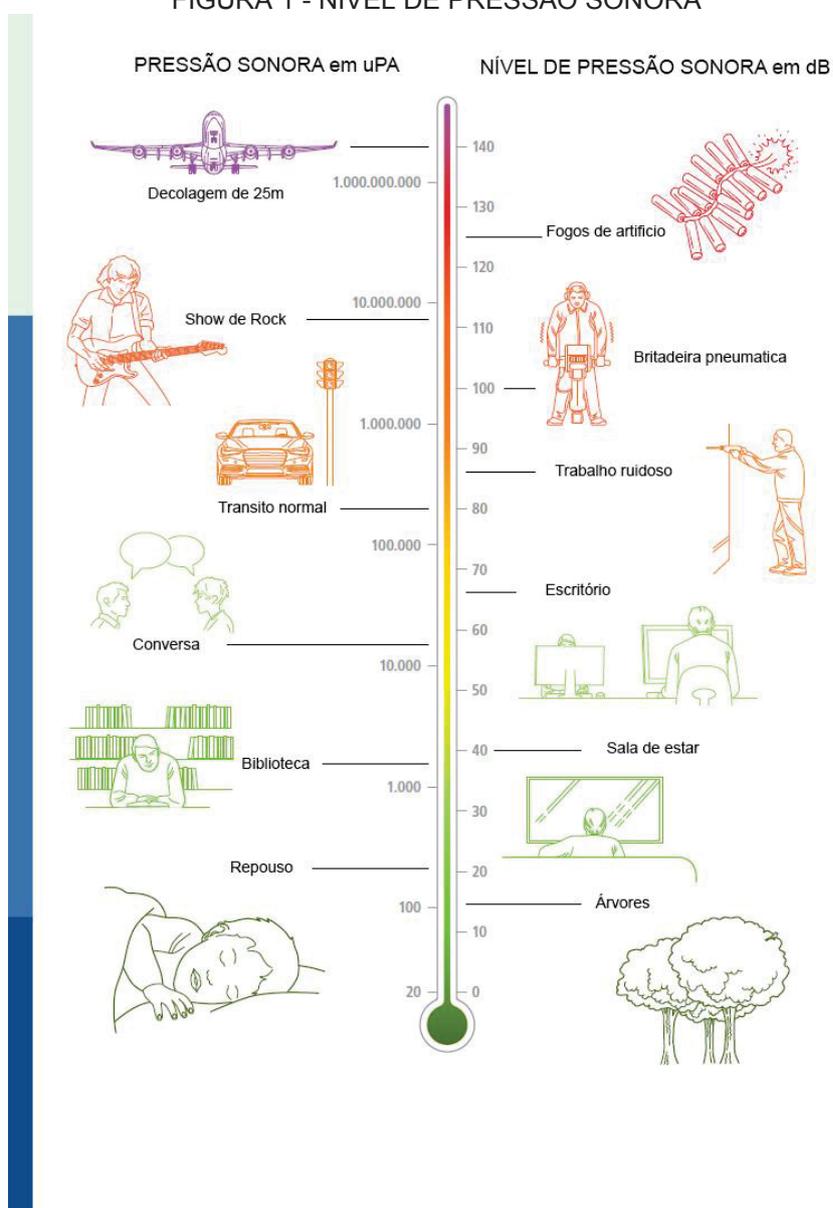
$$p_t^2 = p_0^2 10^{0.1NPS_1} + p_0^2 10^{0.1NPS_2} \dots + p_0^2 10^{0.1NPS_n} [dB]$$

Onde:

p_t^2 : Nível de pressão sonora total;

NPS_n : número de níveis de pressão sonora que se deseja somar.

FIGURA 1 - NÍVEL DE PRESSÃO SONORA



FONTE: Brüel & Kjaer, traduzido pelo autor (2018)

2.2 RUÍDO DE FUNDO

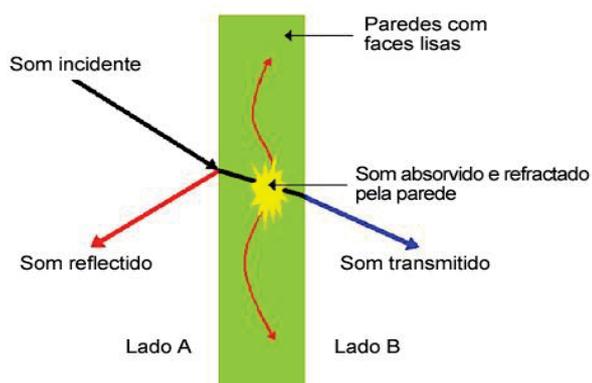
Em equivalência com Harris (1998), o ruído proveniente de diversas fontes com exceção da fonte de interesse é denominado ruído de fundo. De acordo com Augustynska et al (2010), níveis elevados de ruído de fundo na sala de aula forçam os professores a elevar sua intensidade vocal a fim de que o aluno compreenda com clareza seu discurso. Zannin, Ferreira e Sant'ana (2009), Lubman e Sutherland (2003), afirmam que quantidade excessiva de ruído de fundo e um elevado tempo de reverberação em salas de aula são fatores de natureza mecânica que dificultam a comunicação entre professores e alunos, prejudicando o processo de ensino-aprendizagem.

2.3 ABSORÇÃO SONORA

Conforme Beranek (1960) quando a energia acústica da onda sonora, que é propagada pelo atrito do movimento das moléculas de ar, encontra em sua trajetória a superfície de um material, ao qual é absorvido no seu interior não sendo mais dissipada, diz-se que houve a absorção sonora.

Para cada material, há uma capacidade de absorção, e para isto, se dá o nome de Coeficiente de Absorção Sonora (α), significando a relação entre a quantidade de energia sonora que incide sobre determinado material, e aquela que é refletida por ele. “A quantidade absorvida vai depender da frequência dos sons, pois sons mais agudos, com maiores frequências, são mais absorvidos do que os sons graves, com menores frequências” (FILHO, 2014). A Figura 2 demonstra a interação entre onda e barreira.

FIGURA 2 - ABSORÇÃO SONORA E INTERAÇÃO ENTRE ONDA E PAREDE



FONTE: Ciência e tecnologia da borracha (2017)

O coeficiente de absorção sonora de um dado material normalmente utilizado nas aplicações é aquele obtido experimentalmente em uma câmara de testes especial denominada de Câmara Reverberante.

A absorção de um som vai depender do material que se encontra na sua trajetória, e seu respectivo coeficiente de absorção sonora, além da área da superfície de contato. Levando em conta uma sala com diferentes materiais, com seus respectivos coeficientes de absorção sonora, faz-se necessário o seguinte cálculo, a fim de se determinar a absorção sonora das superfícies do recinto:

$$A = \sum S_i \cdot \alpha_i$$

Em que:

A: absorção sonora total do recinto em m²;

S_i: área superficial de cada elemento da sala em m² (forro, piso, paredes, mobília, etc.);

α_i: coeficiente médio de absorção sonora correspondente de cada elemento.

Onde o coeficiente de absorção médio ponderado em superfície é dado por:

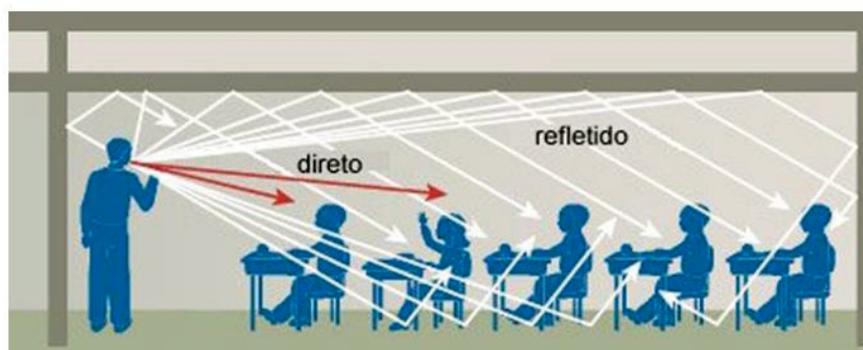
$$\bar{\alpha} = \frac{\sum S_i \cdot \alpha_i}{\sum S_i}$$

2.4 TEMPO DE REVERBERAÇÃO

A norma ISO 3382-2:2008 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION) define tempo de reverberação (T_R) como sendo o tempo de duração – em segundos – necessário para que a intensidade de energia sonora, na média do espaço em um recinto, diminua em 60 dB depois que a fonte da emissão parar. Pode ser avaliado com base em uma faixa dinâmica menor do que 60 dB e extrapolado para um tempo de decaimento de 60 dB que é rotulado em conformidade. Como exemplo para a determinação de T_{20} , o intervalo avaliado para curvas de decaimento é de 5 dB a 25 dB abaixo do nível de inicial, para o T_{30} a curva de decaimento vai de 5 a 35 dB.

A Figura 3 ilustra os caminhos percorridos pelas ondas sonoras:

FIGURA 3 - SOM DIRETO E REFLETIDO



FONTE: UFRRJ (2018)

O T_R é um importante parâmetro no estudo acústico de um ambiente fechado, na caracterização do conforto acústico, principalmente em ambientes onde há a necessidade do bom entendimento das palavras, como em sala de aula, por exemplo. De acordo com as Normas ISO 3382-1 (ISO, 2009) e ISO 3382-2 (ISO, 2008), o tempo de reverberação pode ser medido pelo método do ruído interrompido e pelo método integrado de resposta impulsiva. (ZANNIN; PASSERO E FIELDER, 2010) (KARABIEBER E VALLET, 2003).

Neste trabalho foi usado o método de resposta impulsiva tanto para o STI bem como para T_R e D_{50} .

Everest (2001) afirma que as características físicas de uma sala, como espessura de paredes, pisos e tetos e a quantidade de móveis e objetos, além do volume e dos os coeficientes de absorção dos materiais, vão influenciar na reverberação do som no ambiente, pois ambientes com pouca absorção, haverá tempo de reverberação mais longo, e ambientes com mais absorção, o tempo de reverberação é mais curto. Para ambientes com T_R curto em excesso, é dito que esta é uma a sala surda ou morta.

A relação entre o tempo de reverberação, volume da sala e absorção sonora, conhecida como fórmula de Sabine, é dada por:

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{A}$$

Em que:

T: tempo de reverberação em segundos;

V: volume do recinto em m^3 ;

A: absorção total em Sabine.

Em casos em que o coeficiente médio de absorção (absorção total em Sabine) for maior que 0,30, utiliza-se para o cálculo do tempo de reverberação a fórmula de Eyring, dada por:

$$T = \frac{0,161 \cdot V}{-2,3 \cdot S \cdot \log(1 - \underline{\alpha})}$$

Em que:

V: volume do recinto em m^3 ;

$\underline{\alpha}$: coeficiente de absorção médio ponderado em superfície;

S: superfície total absorvente em m^2 .

Uma outra forma de calcular o tempo de reverberação em ambientes fechados com uma distribuição assimétrica da absorção foi proposta no *Journal Acoustica* (PUCHADES, 1988):

$$RT = \left[\frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1-\alpha_x) + 4mV} \right]^{\frac{S_x}{S}} \cdot \left[\frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1-\alpha_y) + 4mV} \right]^{\frac{S_y}{S}} \cdot \left[\frac{0,16V}{-S \cdot \ln(1-\alpha_z) + 4mV} \right]^{\frac{S_z}{S}}$$

Onde:

As três porções correspondem a absorção dos materiais encontrados nos eixos x, y e z;

4mV: absorção do som pelo ar, sendo V o volume do ambiente e m o coeficiente de absorção;

ln: logaritmo neperiano;

α_x : média aritmética do coeficiente de absorção no eixo x, α_y no eixo y e α_z no eixo z.

S: soma da área de todos os materiais

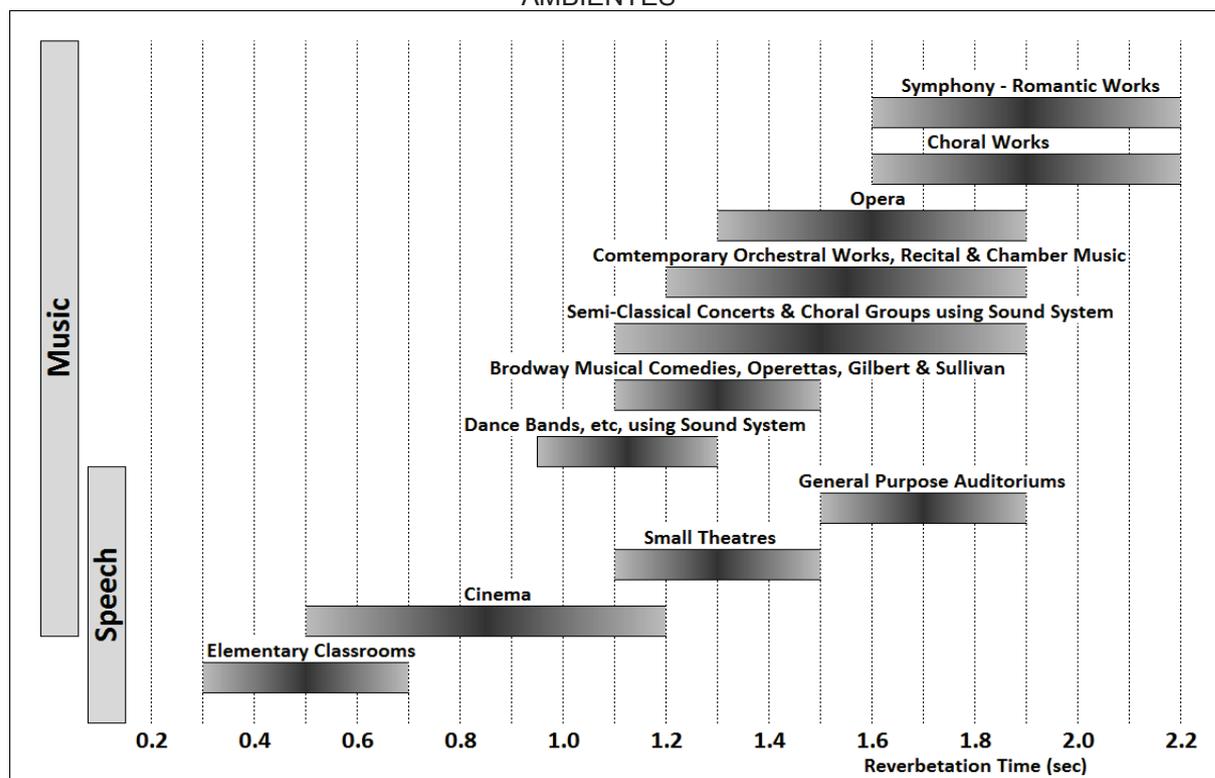
S_x : soma da área dos materiais no eixo x, S_y no eixo y e S_z no eixo z.

O T_R depende também da frequência do sinal em estudo, pois para melhor avaliação é necessário considerar diferentes frequências. Há uma faixa de tempo de reverberação ótima para cada tipo de uso do ambiente, longo além da faixa do ideal perturba a percepção e curto aquém desta faixa pode prejudicar a percepção (LOSSO, 2003).

Para Bistafa (2011) determinados ambientes necessitam de um determinado T_R , desta forma, cada ambiente tem seu T_R ótimo, para que se tenha uma perfeita harmonia acústica no recinto. Para os ambientes com maiores ações da palavra falada, é de querer que o T_R não seja longo, pois caso o som seja longo, isto o torna refletivo, comprometendo inteligibilidade da palavra. Nos casos de salas de concerto, o T_R necessita ser maior, para melhor qualidade acústica da música emitida.

A fim de um melhor entendimento o Gráfico 1 mostra as faixas ótimas de tempo de reverberação para vários usos de ambiente.

GRÁFICO 1 - TEMPO DE REVERBERAÇÃO ÓTIMO PARA VARIOS USOS DE AMBIENTES



FONTE: Cavanaugh (2009)

Em conformidade com Ferreira (2006) não existe no Brasil valor recomendado para T_R de salas de aula, e cita levantamento de valores de T_R para salas de aula em diferentes países, considerando as salas mobiliadas e sem ocupantes, compilando dados de outros autores, apresentados na Tabela 1:

TABELA 1 - TEMPOS DE REVERBERAÇÃO RECOMENDADOS PARA SALAS DE AULA EM DIFERENTES PAÍSES

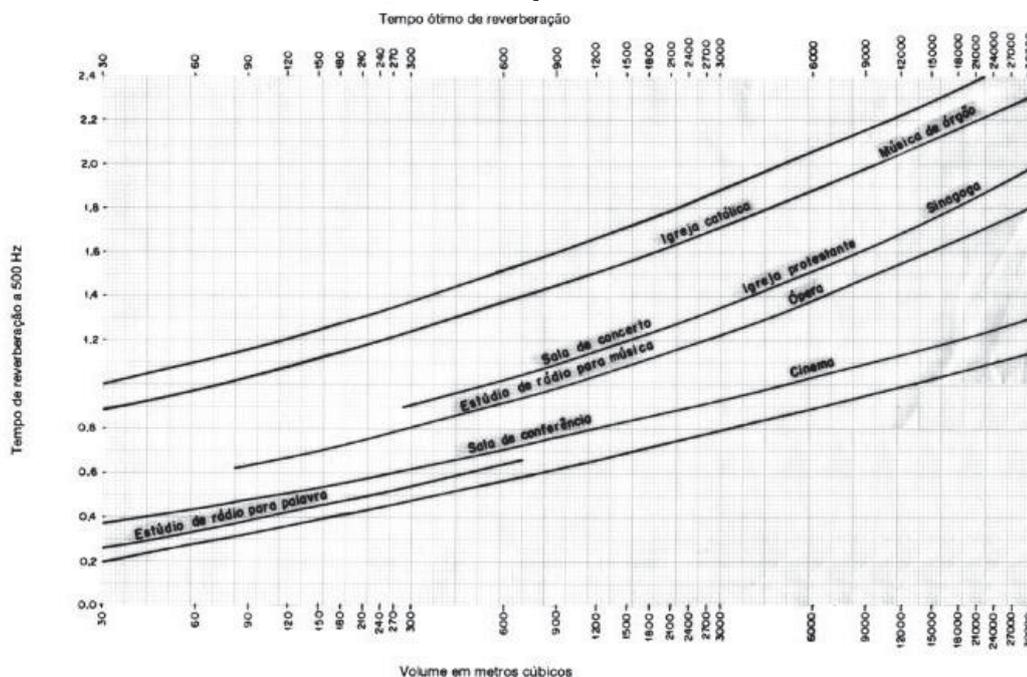
PAÍS	NORMA	TEMPO DE REVERBERAÇÃO (s)	OBSERVAÇÃO
Portugal	Lei 251/87	1	125 – 250 Hz
		0,6 – 0,8	500 – 4000 Hz
França	-	0,4 – 0,8	Salas até 250 m ³ , 500 – 2000 Hz
Reino Unido	BB 87	0,4 – 0,8	Salas entre 72 e 210 m ³
Reino Unido	BS 8205	1	Aulas práticas < 1000 m ³
Estados Unidos	ANSI	0,6 – 0,7	S/R \geq 15 dB(A)

Estados Unidos	ASHA	0,4	$S/R \geq 15$ dB(A)
Finlândia	-	0,6 – 0,9	-
Itália	-	0,5 – 2,0	Depende da freq. e vol.
OMS	-	0,6	Frequência 500 Hz
Bélgica	-	0,9 – 1,5	Salas entre 100 e 1000 m ³
Japão	-	0,5 – 0,7	-
Suécia	-	0,5 – 0,8	-
Suíça	SAI181/11	0,6 – 1,0	-

FONTE: Ferreira (2006)

A NBR-12179/92 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) apresenta valores de tempo de reverberação em função do uso e do tamanho do ambiente.

GRÁFICO 2 -TEMPO DE REVERBERAÇÃO ÓTIMO PARA FREQUÊNCIA DE 500 Hz



FONTE: NBR – 12179/1992 (1992)

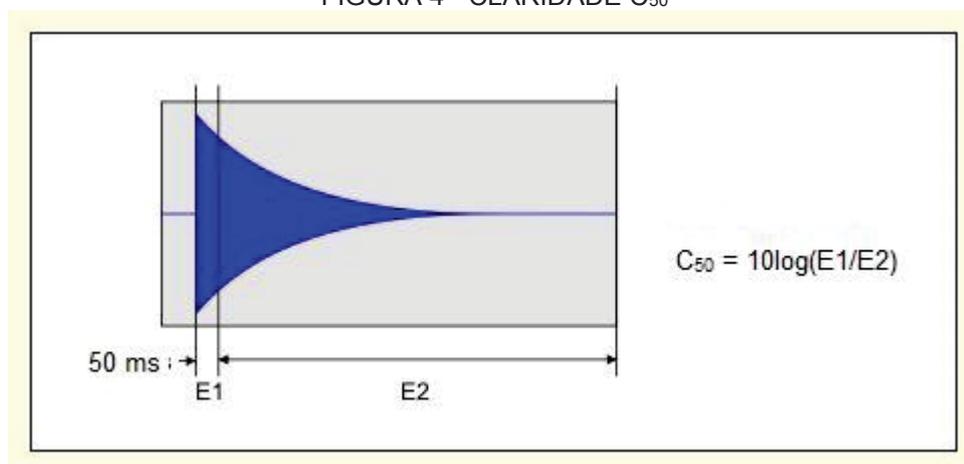
Complementando, a ANSI/ASA S12.60(2010), define um T_R de 0,6 segundos como ótimo em ambientes de aprendizado com volume inferior a 283 m³ e de 0,7 segundos entre 283 e 566 m³.

2.5 CLARIDADE E DEFINIÇÃO

A clareza está definida na ISO 3328-1 (2009) como a relação logarítmica de energia sonora chegando cedo e atrasado, onde "cedo" significa "durante os primeiros x milissegundos" e "atrasado" significa "após os primeiros x milissegundos". Os valores de clareza mais práticos variam de -10 a 20 dB. Como exemplo, o C_{80} é definido conforme a Figura 4 e equação abaixo:

$$C_{50} = 10\log\left(\frac{\int_0^{0,05s} p^2(t)dt}{\int_{0,05s}^{\infty} p^2(t)dt}\right)$$

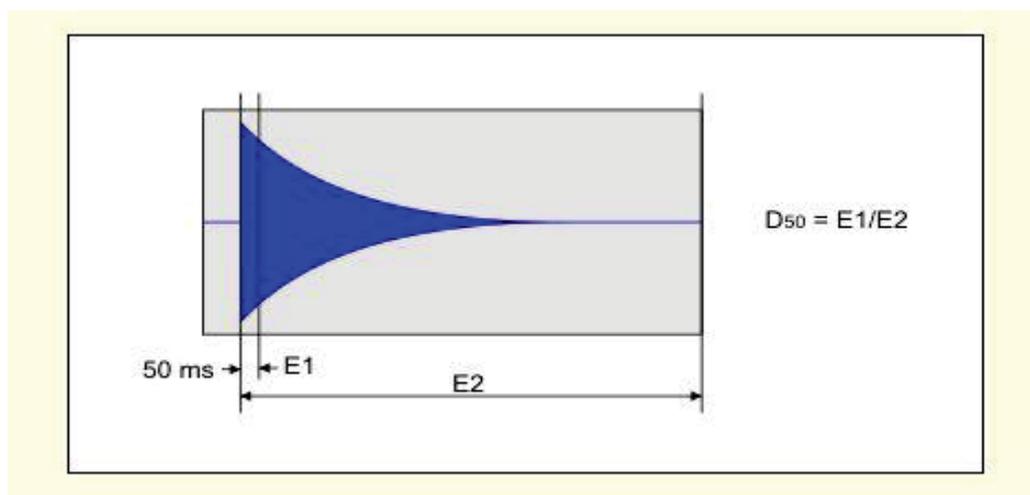
FIGURA 4 - CLARIDADE C_{50}



FONTE: DIRAC 5.0 (2017)

O parâmetro D_{50} conhecido como definição de som é a razão entre a energia sonora chegando "cedo" e a total, expressa em porcentagem, conforme a equação e a Figura 5 mostram:

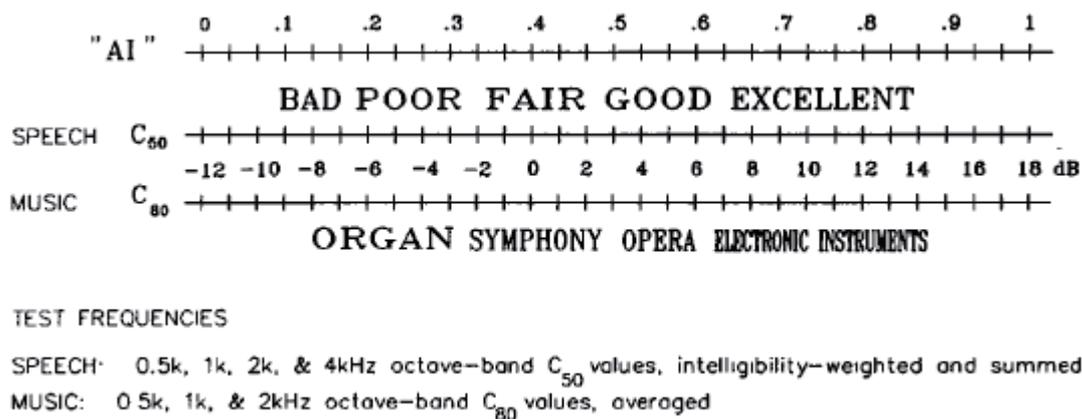
$$D_{50} = \frac{\int_0^{0,05s} p^2(t)dt}{\int_0^{\infty} p^2(t)dt}$$

FIGURA 5 - DEFINIÇÃO DE SOM, D_{50} 

FONTE: DIRAC 5.0 (2017)

Fasold e Veres especificam um valor de D_{50} acima de 0,50 como referência para uma boa inteligibilidade.

Já Marshall (1994) propôs uma escala qualitativa contemplando valores de índice de articulação (AI) e claridade de som (C_{50}) conforme apresenta a Figura 6:

FIGURA 6 - RELAÇÃO PROPOSTA ENTRE ESCALAS DE AI, C_{50} E C_{80} 

FONTE: Marshall (1994)

A partir desta escala proposta por Marshall e levando em conta que os valores de C_{50} e D_{50} são um em função do outro, conforme a ISO 3382-1:2009:

$$C_{50} = 10 \log \left(\frac{D_{50}}{1 - D_{50}} \right) \text{ dB}$$

Ansay e Zannin (2016) calcularam a partir da escala de C_{50} , proposta por Marshall, uma escala também qualitativa para valores de D_{50} , exibido no Quadro 1:

QUADRO 1 - VALORES QUALITATIVOS PARA D_{50}

INTELIGIBILIDADE:	D_{50}
Excelente	0,86 até 1,0
Bom	0,67 até 0,86
Razoável	0,39 até 0,67
Pobre	0,17 até 0,39
Ruim	0,06 até 0,17

FONTE: Ansay e Zannin (2016)

A vantagem em utilizar o D_{50} em detrimento da claridade é que os valores da claridade de som são em decibéis (nível de pressão sonora), ou seja, estão em escala logarítmica e seria trabalhoso calcular as médias dos pontos medidos nas salas de aula, pois a média de nível de pressão sonora se dá pela equação a seguir:

$$\overline{NPS} = 10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_i^n 10^{NPS_i/10} \right)$$

Onde:

\overline{NPS} : média do nível de pressão sonora;

NPS_i : níveis de pressão sonora de i até n .

Já os valores de D_{50} são unidades decimais expressos em percentual, assim podemos obter médias aritméticas com mais facilidade.

2.6 ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA (STI)

A inteligibilidade da fala é descrita por Long (2006, p. 93-94) como um método de medição direta do entendimento da fração de palavras ou sentenças por um ouvinte. O método mais direto de medir a inteligibilidade é usando sentenças que contenham palavras individuais ou sílabas sem sentido, as quais são escutadas por

ouvintes que são questionados a identifica-las. Isto pode ser feito em vários níveis com ou sem ruído de fundo ou reverberação. São usadas voz ao vivo ou gravações, apesar das gravações serem mais consistentes e controladas. Embora esta metodologia seja a “base da maioria de nossos sistemas para prever a inteligibilidade, é altamente desejável ter um método eletrônico de medir diretamente essas quantidades” (LONG, 2006, p. 149).

De forma geral, para medir a inteligibilidade da fala várias condições de medição podem ser aplicadas. Se o sinal de fonte é injetado diretamente em um sistema de reforço de som, através de microfone, nenhuma fonte de som separada é necessária. Para simular um falante real, um simulador de boca deve ser usado. No caso de o ruído de fundo ser significativo, o sinal de fonte deve ter um espectro de voz padrão, de acordo com a IEC 60268-16:2011, e o nível de saída de voz deve ser calibrado. Ainda atendendo a IEC 60268-16:2011 o microfone receptor deve ser sempre omnidirecional.

O padrão de fala humana é complexo, e o sinal sinusoidal simples não imita com precisão o comportamento, conforme descrito por (LONG, p150, 2006). Houtgast e Steeneken, cientistas holandeses, desenvolveram um sistema de medição, chamado de função de transferência modular (MTF), que replica muitas das propriedades da fala humana.

A ideia por trás do MTF é que a fala consiste em bandas moduladas de ruído. Long (2006, p. 149) relata que nossas cordas vocais vibram para produzir uma faixa de ruído, enquanto que nossas bocas a modulam em várias frequências para formar palavras. Para recriar este padrão, começamos com uma faixa de oitava de ruído. Nossas cordas vocais vibram para produzir a banda do ruído, enquanto que nossas bocas o modulam com um tom de baixa frequência.

Steeneken and Hougast (1973, 1985) desenvolveram um algoritmo para transformar um conjunto de valores m em um índice de transmissão de fala por meios da razão de um sinal ruído aparente expresso como um nível. Este nível é a razão sinal ruído (L_{SNapp} ou SNR) que poderia produzir o fator de redução de modulação, tendo toda a distorção causada pelo ruído intruso, independentemente da causa da distorção.

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

Onde:

L_{SNapp} : sinal aparente para razão de ruído;

m : modulação do fator de redução.

Uma média ponderada de 98 sinais de ruído aparente formam o STI após aplicar uma normalização:

STI = 1,0 quando $L_{SNapp} \geq 15$ dB para os 98 pontos;

STI = 0,0 quando $L_{SNapp} \leq 15$ dB para os 98 pontos;

e,

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

Quando:

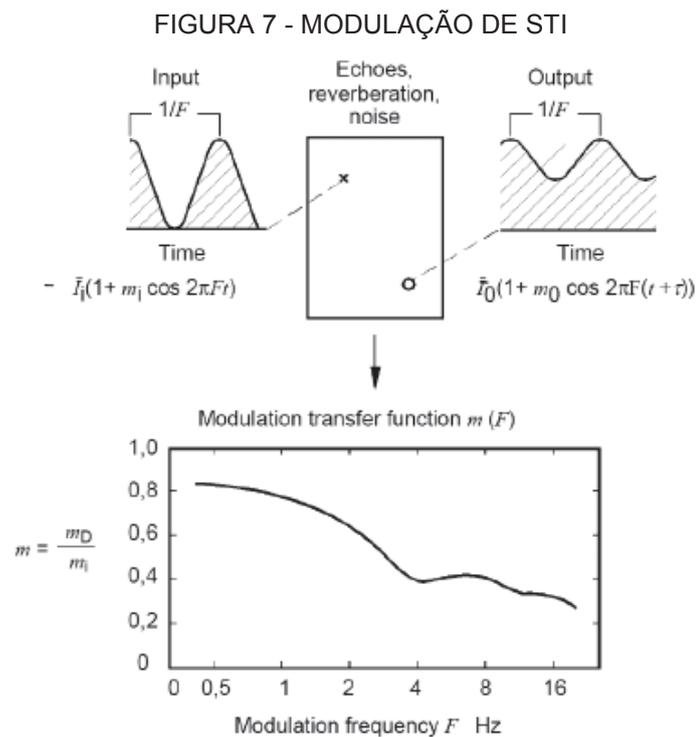
\bar{L}_{SNapp} : média aparente da relação sinal – ruído (dB);

w_i : ponderação para oitavas de 125 Hz a 8K Hz.

Então:

$$STI = \frac{[\bar{L}_{SNapp} + 15]}{30}$$

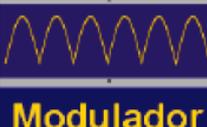
A Figura 7 ilustra a função de transferência de modulação, indicando influência de ruído, eco e reverberação:



FONTES: IEC 60268-16 (2011)

O método STI inclui medidas dentro de sete bandas de oitava e 14 frequências de modulação dentro de cada banda de oitava. O STI “original” pode ser chamado também de full STI ou STI-14. Trata-se de um esquema de medição universal que é aplicável a todos os tipos de sistemas de comunicação (exceto vocóderes). Neste método, os sinais de teste para sete bandas de oitava e 14 frequências de modulação são transmitidos e analisados sucessivamente. A Figura 8 demonstra a matriz com valores m típicos de um ensaio real, com destaque do valor m para a combinação de banda de oitava K de 1kHz e frequência de modulação f de 2Hz.

FIGURA 8 - MATRIZ COM VALORES DE MEDIÇÃO DE STI

Banda de oitava		k	1	2	3	4	5	6	7
Frequência central		Hz	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Frequência de modulação 	F[Hz]	f							
	0,63	1	0,61492	0,63433	0,71096	0,74323	0,79466	0,93494	0,99339
	0,8	2	0,5475	0,56909	0,66291	0,6896	0,74626	0,91249	0,99067
	1	3	0,47329	0,49423	0,58963	0,61991	0,68634	0,88577	0,98651
	1,25	4	0,42455	0,40989	0,53317	0,53831	0,64925	0,85708	0,98322
	1,6	5	0,37591	0,3177	0,49855	0,5161	0,60244	0,82768	0,97714
	2	6	0,32873	0,26033	0,47709	0,56036	0,56429	0,80212	0,97191
	2,5	7	0,26325	0,24494	0,43642	0,52033	0,53164	0,76004	0,96414
	3,15	8	0,27836	0,2524	0,40583	0,50771	0,50469	0,76227	0,95457
	4	9	0,30448	0,27341	0,41424	0,47877	0,48419	0,74187	0,94587
	5	10	0,22861	0,2322	0,38552	0,47717	0,46186	0,72289	0,93561
	6,3	11	0,12526	0,20446	0,38583	0,44943	0,46705	0,706	0,92367
	8	12	0,10567	0,26767	0,3414	0,44252	0,45744	0,68524	0,91187
	10	13	0,12026	0,1899	0,32927	0,4299	0,43287	0,64697	0,8961
12,5	14	0,090121	0,21126	0,31575	0,39218	0,37427	0,61092	0,87234	

FONTE: Muller (2005)

No entanto, certas aplicações não exigem um esquema de medição tão robusto. Para essas medidas, podem ser aplicadas simplificações específicas do método de medição para aumentar a eficiência de medição. As várias simplificações do procedimento de medição levaram a diferentes esquemas de medição adaptados a grupos específicos de aplicações. As versões respectivas são: STI-3, uma versão limitada e simplificada do STI que usa três frequências de modulação. O STITEL (índice de transmissão de voz para canais de telecomunicação) é uma versão despojada do STI e não possui cobertura robusta para canais de transmissão com distorção no domínio do tempo e para sistemas não-lineares. O STIPA (índice de transmissão de voz para sistemas de endereços públicos) é uma versão despojada do STI-14 e possui uma cobertura robusta para distorções no domínio do tempo e limitações no domínio da frequência. É obtida uma cobertura limitada de distorções não-lineares. O sistema RASTI (índice de transmissão de discurso, *room acoustical* ou *rapid* STI) baseia-se no MTF para apenas duas bandas de oitava, e é um método

é desenvolvido para comunicações de pessoa a pessoa em um ambiente acústico de sala e explica a distorção no domínio do tempo.

O STI pode ser medido por um *software* comercial chamado DIRAC da empresa dinamarquesa Brüel & Kjaer. O programa mede as respostas de impulso usando um computador com placa de som e microfones. A partir das respostas de impulso acústico são calculados o espectro de frequência e outros parâmetros acústicos, tais como STI, tempo de reverberação, a clareza e a força do som. Os parâmetros acústicos são baseados na ISO 3382 e IEC 60268-16:2011.

O STI refere-se à inteligibilidade da fala conforme a Quadro 2:

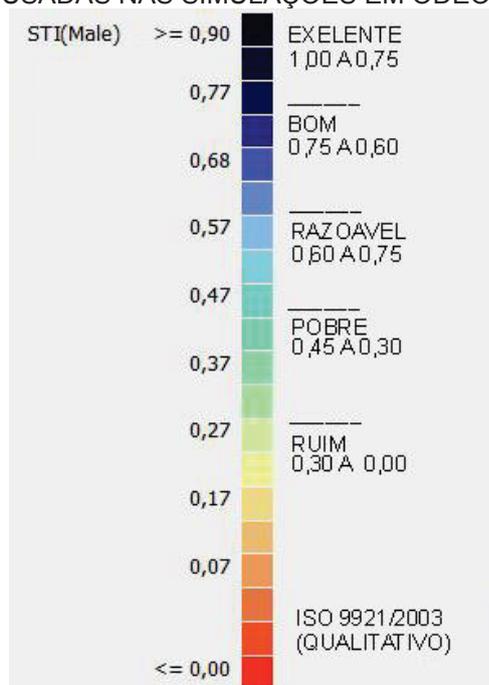
QUADRO 2 - VALORES DE STI RELACIONADOS A INTELIGIBILIDADE DE FALA

STI (VALOR AFERIDO)	INTELIGIBILIDADE
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: ISO 9921 (2003)

A Figura 9 ilustra a escala de cores relacionando os valores qualitativos e quantitativos de STI usados nas simulações feitas no programa ODEON 11.00 Combined.

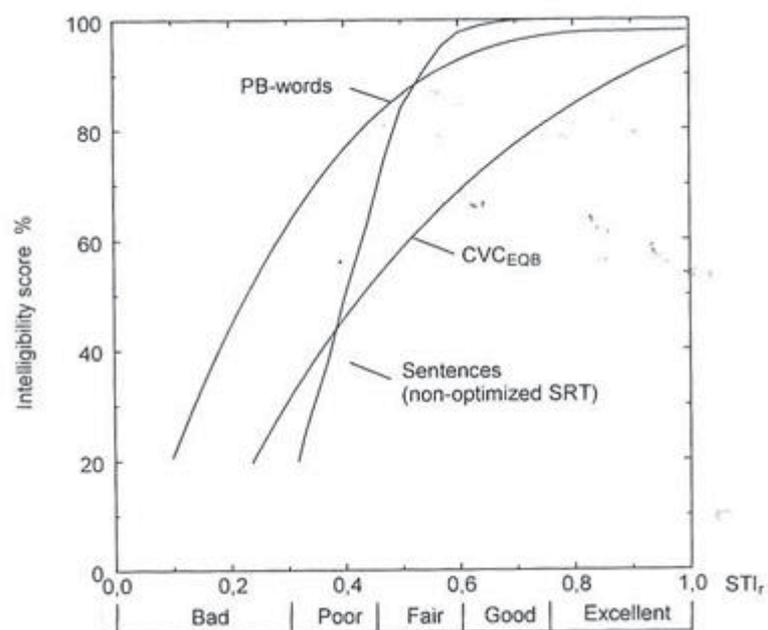
FIGURA 9 – ESCALA DE VALORES QUALITATIVOS E QUANTITATIVOS E RELAÇÃO DE CORES USADAS NAS SIMULAÇÕES EM ODEON



FONTE: ISO 9921 (2003)

A relação entre STI e várias medidas subjetivas de inteligibilidade é mostrada no Gráfico 3:

GRÁFICO 3 - QUALIFICAÇÃO DO STI E RELAÇÃO COM MEDIDAS DE INTELIGIBILIDADE SUBJETIVAS



FONTE: IEC 60268-16 (2011)

3 REVISÃO DA LITERATURA

Na língua inglesa, há um conjunto de palavras foneticamente equilibrado para medir a inteligibilidade da fala que foi padronizado pela ANSI e está correlacionado com medidas de STI. Somerhoff e Rosas (2007) percebendo a ausência de trabalhos relacionando a fonética do espanhol com a inteligibilidade de fala, estudaram a partir de dois conjuntos de palavras espanholas a relação de inteligibilidade de fala com o STI. Concluíram que as medições de inteligibilidade diferem das listas usadas e que nenhum dos conjuntos espanhóis está correlacionado com a STI como ocorre com o conjunto inglês normalizado pela ANSI.

Por outro lado, um estudo comparando inteligibilidade de fala antes e depois de tratamento acústico em três salas de aula, na Itália, usando 983 alunos entre 7 e 10 anos de idade foi realizado por Astolfi et al (2012) que relacionou os resultados com STI, encontrando nexos entre o STI e a inteligibilidade.

Na Universidade de Extremadura, na Espanha, 17 auditórios e salas de aula foram avaliados por níveis de ruído de fundo, tempo de reverberação e inteligibilidade. O estudo da inteligibilidade foi realizado medindo os parâmetros objetivos e usando testes de fala, concluindo que o valor STI é um bom preditor da inteligibilidade das salas. Contudo o STI foi mensurado usando uma caixa omnidirecional o que pode ter comprometido as leituras, pois para o STI deve-se utilizar uma caixa direcional.

Tang e Yeung (2006) realizaram um estudo de T_R e STI em 58 salas de escolas primárias e secundárias de Hong Kong, sendo 19 salas de aula para ensino em geral, enquanto o restante consistiu em salas de computadores, salas de música e laboratórios. Para as salas de aula de ensino obtiveram 3 médias de STI: 0,62 com as janelas fechadas e ar condicionado desligado; 0,59 com janelas fechadas e ar condicionado ligado; e 0,63 com janelas completamente abertas e ar condicionado desligado. Neste estudo eles conseguiram uma boa congruência entre o STI estimado, a partir dos tempos de reverberação, e o medido.

Milulski e Radosz em 2011, fizeram um estudo sobre propriedades acústicas de 110 salas de aula em cinco escolas primárias de Varsóvia na Polónia, usando como critério o tempo de reverberação e o índice de transmissão da fala. A pesquisa mostrou uma grande diversidade de propriedades acústicas entre as salas de aula dentro de cada uma das escolas e entre as escolas. Essas diferenças segundo os autores se devem a diferenças construtivas e dos materiais usados nas salas. Uma

análise de correlação foi realizada entre o índice de transmissão de fala STI e uma média de tempo de reverberação entre 500 a 2000Hz, bem como para o STI e uma média de tempo de reverberação sugerido pelos autores de 250 a 4000Hz, chegando a conclusão que a faixa mais ampla (sugerida) tem correlação um pouco melhor com o STI, porém a diferença é pequena. Além disso, o artigo apresenta uma melhoria significativa das propriedades acústicas das salas de aula usando tapete, no experimento foi mostrado que um tapete de 20 m² diminui o tempo de reverberação em 25% em salas com um volume médio de 160 m³.

Em 2013, Ali fez um estudo medindo ruído e fazendo questionários com 300 alunos de 13 a 15 anos de idade a respeito ao ruído em uma escola em Assiut, no Egito. Investigou fontes de ruído, alternativas para minimiza-las e o efeito dos ruídos no desempenho dos alunos. Constatou níveis de ruído entre 61,3 e 73,2 dB(A) além de 57% dos entrevistados dizerem que o ruído impediu a realização de aprendizagem.

Longoni et al (2016) mediram o STI em 4 salas de aula universitárias na cidade de Córdoba na Argentina. Utilizaram o método de resposta impulsivo com um simulador de boca B&K 4128-C como fonte sonora. Foram realizadas medições com sistemas de ventilação e ar condicionado ligados e desligados. Todas as salas apresentaram uma diferença para baixo significativa com o sistema de ventilação e ar condicionado ligados.

Na Finlândia, Sala e Rantala (2016) verificaram o efeito da acústica em 40 salas de aula. Mediram o tempo de reverberação, o índice de transmissão de fala e níveis de ruído de fundo nas salas de aula desocupadas e mediram também os níveis de ruído de atividade durante a instrução da sala de aula. Os resultados mostraram que apenas algumas salas de aula preenchem os critérios acústicos do padrão nacional finlandês (SFS 5907; Finish Standads Association SFS 2004-09-06) e nenhuma sala de aula preencheu o critério de acústica de acordo com a STI que deveria ser maior que 0,80. Na maioria das salas de aula, o nível de ruído de fundo era maior do que o recomendado e os níveis de ruído de atividade eram altos para a audição e a comunicação. Concluíram que o ambiente acústico era prejudicial à comunicação e à aprendizagem.

O efeito do ruído exterior, principalmente devido ao isolamento do som do tráfego e da fachada no nível de ruído interno e na inteligibilidade da fala em mais de 100 salas de aula, na Itália, foi estudado por Secchi et al (2017). As salas de aula estudadas contemplaram todos os níveis de ensino, diferentes épocas e técnicas de

construção e em tres diferentes regiões da Itália, sendo uma amostragem representativa das escolas típicas italianas. As correlações entre as principais características das fachadas, o ano de construção e o isolamento sonoro da fachada foram investigadas. Além disso, a influência do ruído proveniente do exterior no nível de ruído interno, inteligibilidade da fala foi analisada com referência às situações antes e depois dos trabalhos realizados para melhorar os desempenhos acústicos das fachadas. Os resultados mostram que o nível de pressão sonora interna devido ao ruído do tráfego é consideravelmente reduzido após a melhoria do isolamento acústico da fachada, enquanto outros tratamentos para superfícies interiores devem ser necessários para reduzir o tempo interno de reverberação e para melhorar a inteligibilidade da fala.

Em Belo Horizonte, Rabelo et al (2014) realizaram a medição de STI em 18 salas de aula de 9 escolas públicas onde obtiveram valores de STI entre 0,47 e 0,70, com uma mediana de 0,65. Fizeram também um estudo da inteligibilidade de fala e comprovaram que com o menor valor de TR e maior valor de STI o desempenho dos alunos no ditado foi melhor.

Uma investigação de condições acústicas ótimas para salas de aula usando modelagem em ODEON foi feita por Reich e Bradley (1998). Determinaram as condições ideais para fala a partir de relação entre máximo útil e prejudicial ao som. Os resultados mostram que um tempo ótimo de reverberação (média frequências) para uma sala de aula é de aproximadamente 0,5 s, mas a inteligibilidade da fala não é muito sensível a pequenos desvios desse ótimo. A inteligibilidade da fala é influenciada mais fortemente pelos níveis de ruído ambiente e a localização ideal do material absorvente de som foi encontrada nas partes superiores das paredes.

No instituto de pesquisa para acústica em construção, em Ottawa no Canadá, Bistafa e Bradley (2000) fizeram simulações com dois programas de modelagem, o Odeon 4.1 e o Raynoise 3.0, verificando que apesar de muito bons e com resultados próximos o desempenho do ODEON 4.1 apresenta erros menores para C_{50} e STI. Eles categorizam, assim como Hodgson (1996) que um erro relativo para valores de TR a nível de engenharia seria de até 10%. Embora a ISO 3382-1 estime uma precisão acima de 5% em bandas de oitava.

Comparando a simulação acústica e a medição *in situ* para índice de transmissão de fala (STI), inteligibilidade da fala em um escritório, um laboratório, uma sala de conferências multimídia e uma câmara semi-anecóica, Zhu et al (2015) revela

que o STI pode ser predito com precisão por simulação acústica, usando o software de acústica de sala ODEON, quando há uma boa concordância entre os modelos virtuais e as salas. No geral, o autor considera a modelagem acústica de ambientes problemática, e diz ser difícil obter resultados precisos de predição de inteligibilidade da fala usando uma técnica de simulação, quando a sala ainda não foi construída.

Zannin et al. (2009) comparou e avaliou valores de tempo de reverberação TR medidos com simulações de STI em salas de dois edifícios da Universidade Federal do Paraná construídos em épocas diferentes, examinando a influência de diferentes materiais de acabamento sobre o TR e sobre o STI. As simulações chegam a indicar para uma das salas, com TR médio de 2,5 s., a necessidade de substituição de materiais de acabamento, especialmente no piso e no teto, por materiais com maior coeficiente de absorção sonora. Os resultados das simulações usando insumos com absorção melhor apontam para a redução de quase 2 s no TR e uma melhora no STI de valores entre 0,39 e 0,42 para valores entre 0,73 e 0,76.

Nestoras e Dance (2013) investigaram a inter-relação dos parâmetros de acústica de 10 salas universitárias típicas. As medições foram feitas de acordo com os padrões ISO 3382:1-2009, porém com uso de fonte sonora omnidirecional. Verificou-se que clareza e EDT foram relacionadas de forma linear com o índice de transferência de modulação em condições silenciosas, portanto, um excelente preditor de STI.

Segundo a norma IEC 60268-16:2011 a medição de STI deve ser feita com fonte sonora direcional, diferentemente do que foi feito por Alves *et al* (2017), analisando o condicionamento acústico de salas de aula, aferindo STI com fonte omnidirecional.

Em trabalho do XXVII Encontro Brasileiro de Acústica, em 2017, sobre inteligibilidade de fala em sala de aula, Modesto et al (2017), fez medição de STI conforme a norma IEC 60268-16:2011 utilizando uma caixa direcional, porém foram usados os dados da medição de STI para TR também, mas para TR deveria ter sido feita uma nova medição usando fonte sonora omnidirecional. Todavia, não há literatura nenhuma que valide medição de TR com fonte sonora direcional. Neste trabalho serão feitas medições de STI usando fonte sonora direcional e será usada a fonte omnidirecional para as medições de TR e de D_{50} . Além da fonte o volume sonoro para estas medições também é diferente.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho contempla duas etapas: a primeira consiste no levantamento de dados através de medições sonoras e a segunda na modelagem matemática através do *software* ODEON 11.00 *combined*.

Nas medições de STI foram usados um computador, uma placa de som, um medidor de pressão sonora, um equalizador, um amplificador e uma boca artificial (caixa de som direcional), conforme descrito no item 4.2.

Já para a medição do T_R foi empregado um computador, uma placa de som, um medidor de pressão sonora, um amplificador e uma caixa dodecaédrica (caixa de som omnidirecional) detalhado no item 4.3.

É importante ressaltar que as medições de STI e T_R foram feitas separadamente, pois as configurações e os equipamentos para as medições são diferentes.

4.1 LEVANTAMENTOS DE DADOS

Na etapa de levantamento de dados, as medições de STI, T_R e D_{50} foram realizadas nas salas de aula dos dois prédios do Centro Politécnico da UFPR, o da década de 60 onde foram aferidas as salas PG03, PG 04, PG05, PG06, PG07 E PG15, e no prédio novo, de exatas, construído em 2016 onde foram mensuradas as salas PA01, PA03 PA05 e PA06. Esta etapa foi realizada em períodos nos quais as salas não estavam sendo utilizadas para aula. A maior parte das medições ocorreram aos sábados à tarde, assim não houve interferência, dada a não movimentação de alunos.

As medições foram tomadas em silêncio, sem alunos – com exceção dos operadores. As salas estavam com a porta e janelas fechadas, salvo onde o mecanismo das janelas estava estragado que foram os casos da PG03 e da PG04. O ruído externo, que se resumiu a chiro de pássaros, buzinas distantes e aviões mais distantes ainda, sons que formam o ruído de fundo das salas, foram mensurados para o feitiço das simulações. A Figura 10 mostra algumas das salas de aula durante o período de medição.

FIGURA 10 – SALAS DE AULA



FONTE: O autor (2018)

4.2 MEDIÇÕES DO STI

Os *softwares* DIRAC 3.1 e 5.0 da Brüel & Kjaer foram utilizados para medir e calcular o STI. Através da resposta impulsiva da sala a um sinal gerado pelo próprio *software*, o mesmo consegue calcular parâmetros acústicos.

Os equipamentos utilizados para medição do STI foram:

- 1) Computador Sony VAIO com software DIRAC 3.1 (Brüel & Kjaer 7841) instalado;
- 2) Interface de áudio (RME *Fireface 800*);
- 3) Equalizador de nível de pressão sonora (Behringer FBQ 800);
- 4) Amplificador sonoro (Lab. Gruppen LAB 300);
- 5) Boca artificial (Brüel & Kjaer 4227);
- 6) Analisador acústico classe 1 (Brüel & Kjaer 2260);
- 7) Equalizador de nível de pressão sonora (Behringer FBQ 800).

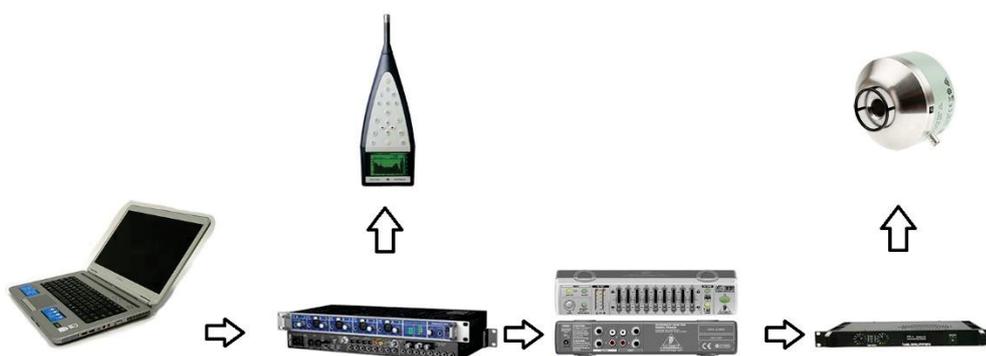
Os equipamentos foram ligados da seguinte forma:

- O computador foi ligado pela saída S400 com cabo firewire 4 x 6 pinos IEEE 1394 na entrada firewire de 6 pinos da interface de áudio;
- A Interface de áudio foi conectada, por cabo P10 usando a saída *output* 1, com o equalizador na entrada input R;

- O equalizador foi conectado pela saída *output* R, com cabo P10, ao amplificador, na entrada *input* Ch A;
- O amplificador em sua saída *output* Ch A que leva um conector NL4FC foi ligado a boca artificial, com o fio vermelho a entrada da boca com uma marca branca;
- O medidor sonoro, usando a conexão específica, foi conectado a interface na entrada *input* 1 (P10) da placa.

A Figura 11 ilustra a sequência de montagem dos equipamentos.

FIGURA 11 – ARRANJO DOS EQUIPAMENTOS PARA MEDIR STI: COMPUTADOR, INTERFACE DE AUDIO, EQUALIZADOR AMPLIFICADOR, BOCA ARTIFICIAL E MEDIDOR DE PRESSÃO SONORA

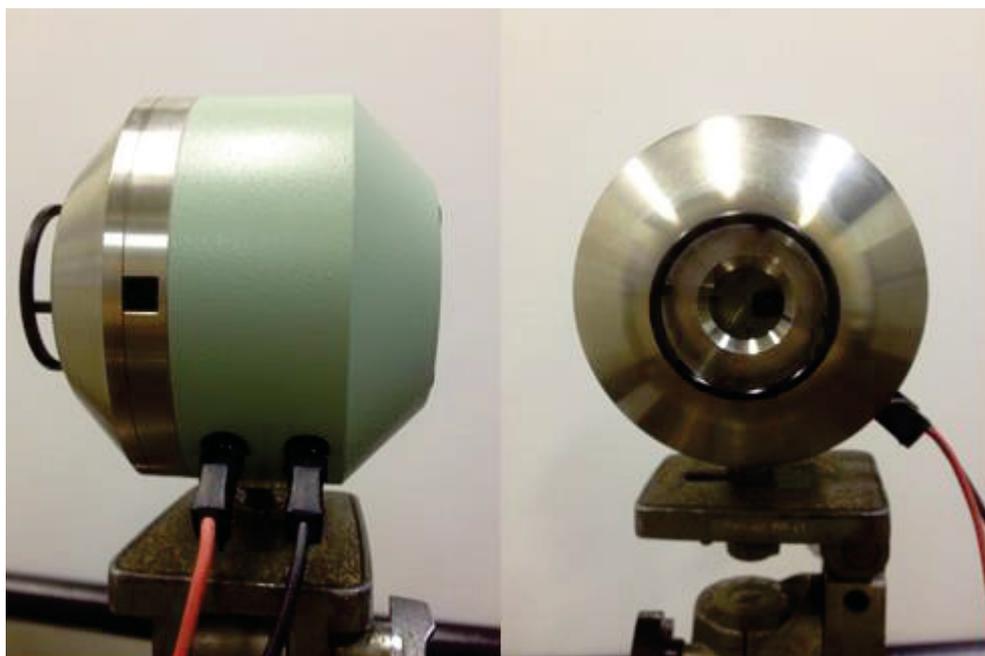


FONTE: O autor (2018)

É importante que se verifique o cabeamento ao medir o STI, pois qualquer ruído eletrônico pode deteriorar os resultados.

Tal como estabelece a norma IEC 60268-16:2011 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2011), a boca artificial possui um diâmetro máximo de 10 cm, semelhante à da boca humana. Com o equalizador sonoro, foram ajustados os níveis sonoros do sinal utilizado, nas frequências de 125 a 8000 Hz, para que não houvesse diferenças superiores a ± 1 dB. Porém devido a qualidade acústica das salas somente na frequência de 125 Hz esta diferença foi maior podendo chegar a 4 dB, uma vez que se atingiu o limite do aparelho e não havia mais margem para equalização.

FIGURA 12 – BOCA ARTIFICIAL BK 4227



FONTE: O autor (2018)

As medidas foram obtidas utilizando a boca artificial sempre na mesma posição: simulando um professor lecionando em pé no tablado da sala de aula a uma altura de 1,50 m. Já o analisador foi movido ao longo da sala, em locais que alunos costumam se sentar para assistir as aulas a uma altura de 1,20 m.

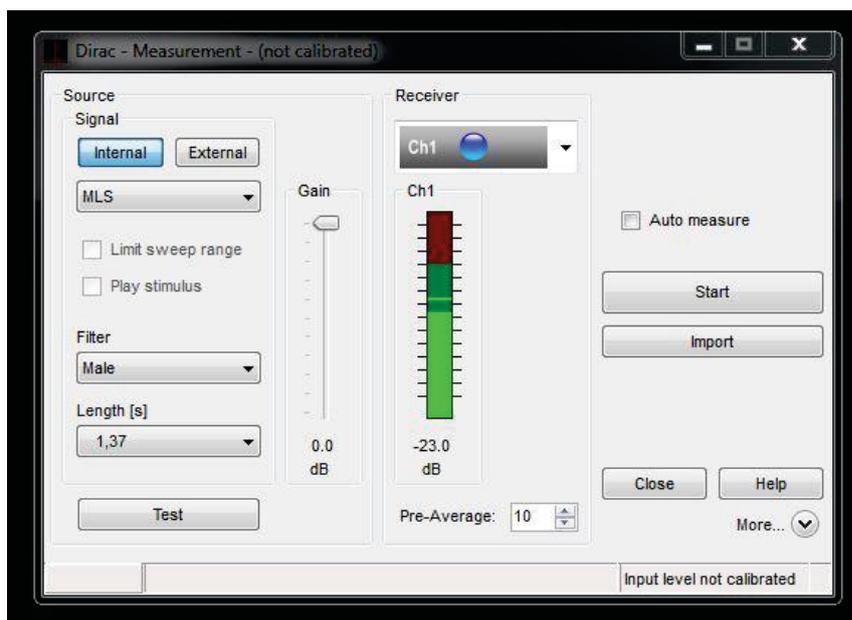
Para iniciar a medição do STI foi necessário realizar a equalização do sinal. Obedecida à ordem de montagem dos equipamentos, o software DIRAC 3.1 foi aberto seguiram-se as etapas:

Clicou-se no botão *Measure* e selecionaram-se as configurações de origem e receptor:

- Sinal de origem: *Internal MLS*;
- Filtro de Fonte: *Pink + Blue*;
- Ligou-se o sinal clicando no botão *Test*;
- Ajustou-se os ganhos do equalizador de modo a obter os mesmos níveis de sinal (dentro de ± 1 dB) em todas as bandas de frequência.

A Figura 14 demonstra a caixa de comando do *software*:

FIGURA 13 – CAIXA DE COMANDO DO DIRAC 3.1 AJUSTADA PARA LEITURA DO STI



FONTES: DIRAC 5.0 (2018)

Realizada a equalização do sinal, alterou-se o filtro para *Male*. Esse filtro é uma ponderação em frequência, conforme norma IEC 60268-16:2011 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2011). Também segundo a norma, a distância de 1 metro entre fonte e receptor foi mantida e o sistema foi então calibrado. Sendo que a distância de 1 metro o nível sonoro equivalente deve ser de 60 dB (A).

A seguir as medições do STI foram iniciadas. Os pontos receptores foram escolhidos de acordo com as posições de ouvinte, e a fonte foi posicionada no local do orador. A altura da fonte e receptor foi considerada seguindo a norma ISO/DIS 3382-1 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2009) dos ouvidos de uma pessoa sentada, 1,20 m.

A direção da fonte e receptor foi considerada a de professor e aluno em sala de aula.

Na etapa de análise de dados, o *software* DIRAC 3.1 forneceu os dados quantitativos e a análise qualitativa relacionada à inteligibilidade. O *software* DIRAC 3.1 utiliza a norma IEC 60268-16:2011 (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2011).

4.3 MEDIÇÕES DO T_R E D_{50}

Foi usado desta vez o mesmo computador, placa de som, amplificador, porém a caixa de som dodecaédrica, ilustrada na figura 15, substituiu a boca artificial.

A medição para o T_R e para o D_{50} é a mesma, então cada ponto medido forneceu os valores de T_R e D_{50} automaticamente.

FIGURA 14 – FONTE SONORA DODECAÉDRICA

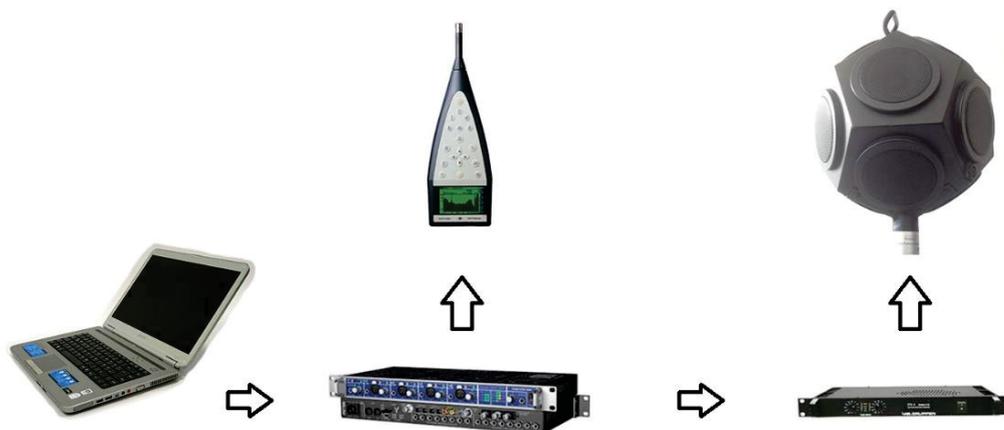


FONTE: O autor (2018)

Os equipamentos foram ligados da seguinte forma:

- O computador foi ligado pela saída S400 com cabo firewire 4 x 6 pinos ieee 1394 na entrada firewire de 6 pinos da interface de áudio;
- A Interface de áudio foi conectada, por cabo P10 usando a saída output 1, com o amplificador na entrada input Ch A;
- A caixa de som dodecaédrica que é omnidirecional foi conectada ao amplificador no output ChA com cabo NL4FC;
- Já o medidor sonoro, usando a conexão específica foi conectado a interface na entrada input 1 (P10) da placa.

FIGURA 15 – ARRANJO DOS EQUIPAMENTOS PARA MEDIR TR: COMPUTADOR, INTERFACE DE AUDIO, AMPLIFICADOR, FONTE DODECAEDRICA E MEDIDOR DE PRESSÃO SONORA

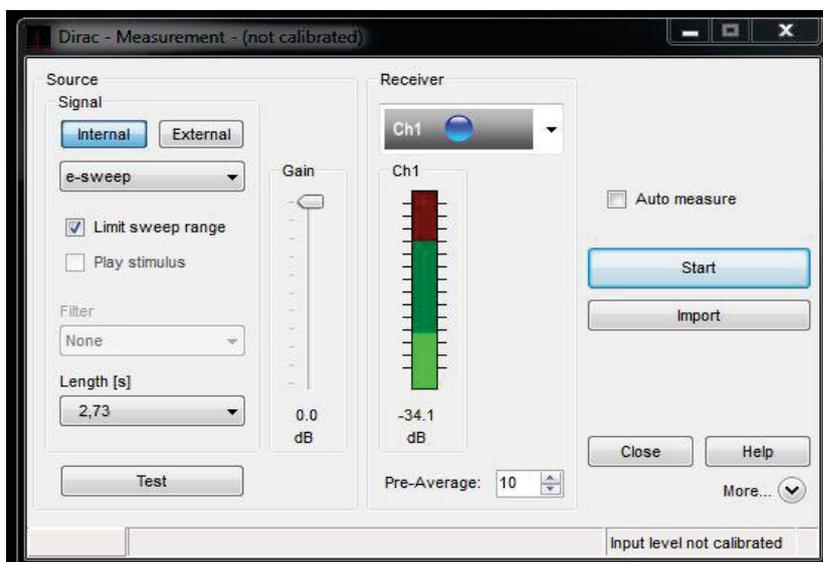


FONTE: O autor (2018)

A caixa deve ser colocada preferencialmente em local típico de emissão de som na sala de aula. Já o medidor de pressão sonora fica em local típico do ouvinte.

Com o computador ligado e o Dirac aberto, selecionadas as configurações da fonte e do receptor: sinal interno e e-sweep, foi ajustado o tempo para um valor maior que o valor de TR estimado. Então clica-se em iniciar, conforme ilustrado na Figura 17:

FIGURA 16 - CAIXA DE COMANDO DO DIRAC 5.0 PARA MEDIR TR



FONTE: DIRAC 5.0 (2018)

4.4 MODELAGENS NO SOFTWARE ODEON 11.00 COMBINED

Primeiramente foram construídas as salas de aula em ambiente virtual, usando um *software* Sketchup na versão livre. As salas já montadas e com suas camadas (forro, piso, janelas, carteiras, assentos, ...) foram finalmente exportadas para o ODEON 11.00.

A Tabela 2 apresenta as dimensões das salas de aula, com o valor do volume calculado pelo programa já descontando tablados, colunas e outros.

TABELA 2 – DIMENSÕES DAS SALAS DE AULA:

SALA	LARGURA (M)	PROFUNDIDADE (M)	PÉ DIREITO (M)	VOLUME APROX.(M ³)
PG 03	7,45	11,3	4,07	322
PG 04	7,5	11,46	3,44	286
PG05	7,47 - 3,20	7,15 - 3,65	3,4	131
PG 06	7,45	11,3	4,07	330
PG 07	10,12	11,24	3,16 - 4,10	396
PG 15	7,47	10,82	2,85 - 4,40	285
PA 01	6,8	11	2,64	197
PA03	6,8	12,34	2,75	234
PA05	6,9	10,29	2,75	195
PA06	6,9	7,24	2,64	132

FONTE: O autor (2018)

Já com o ODEON 11.00 funcionando, seguiu-se o procedimento:

- 1) Vincula-se a cada camada a sua superfície no ícone *material list*, para que o programa possa ter os índices α de absorção sonora de cada material construtivo;
- 2) Insere-se o aut falante direcional no ícone *source receiver list*. No caso foi usado o bb93 que já tinha pronto no programa e é semelhante ao usado nas medições;
- 3) Ainda no *source receiver list* equaliza-se o som da caixa para 60 dB em todas as frequências de 63 a 8000Hz;
- 4) Insere-se no ícone *source receiver list* os pontos de medição nas mesmas localizações dos pontos da medição do STI;
- 5) Com o ícone *define grid* cria-se um “grid” com a camada do piso como referência, e gradeada em quadrados de 50 centímetros, a uma distância

de um metro e vinte centímetros do piso, para ter uma imagem colorida com a intensidade do STI simulado, além dos dados da simulação;

- 6) Em *room setup* inserem-se os dados de ruído de fundo;
- 7) É realizada a simulação marcando os ícones do grid, eixos e então clicar-se em “JOB”.

Por fim, as superfícies e o design das salas foram ajustadas modificando abertura e fechamento de janelas, colocação de cortinas, etc., para que as simulações ficassem com os valores de STI próximos ao valor medido.

Com as salas em ambiente virtual já com os resultados bastante próximos do real foi realizada uma nova modelagem, desta vez com o forro acústico, com a intenção de verificar a mudança na acústica.

5 RESULTADOS

5.1 SALAS DE AULA DO PRÉDIO ANTIGO DO CENTRO POLITÉCNICO

As salas de aula do prédio antigo do Centro Politécnico variam com relação aos materiais construtivos, como são antigas, com o passar do tempo já tiveram alterações, como a retirada de tablado, a troca de carteiras e outros.

A mudança mais significativa para a qualidade acústica destas salas foi a substituição do antigo forro acústico (Celotex M1) por um forro novo, de PVC. A Tabela 3 apresenta os índices de absorção dos forros antigo e novo.

TABELA 3 - VALORES DE ABSORÇÃO DOS FORROS ANTIGO (CELOTEX M1) E NOVO (PVC)

MATERIAL	125 HZ	250 HZ	500 HZ	1000 HZ	2000 HZ	4000 HZ	8000 HZ
Celotex M1	0,12	0,48	0,50	0,79	0,93	0,82	0,48
PVC	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06

FONTE: Knudsen (1978) e Silva (2009)

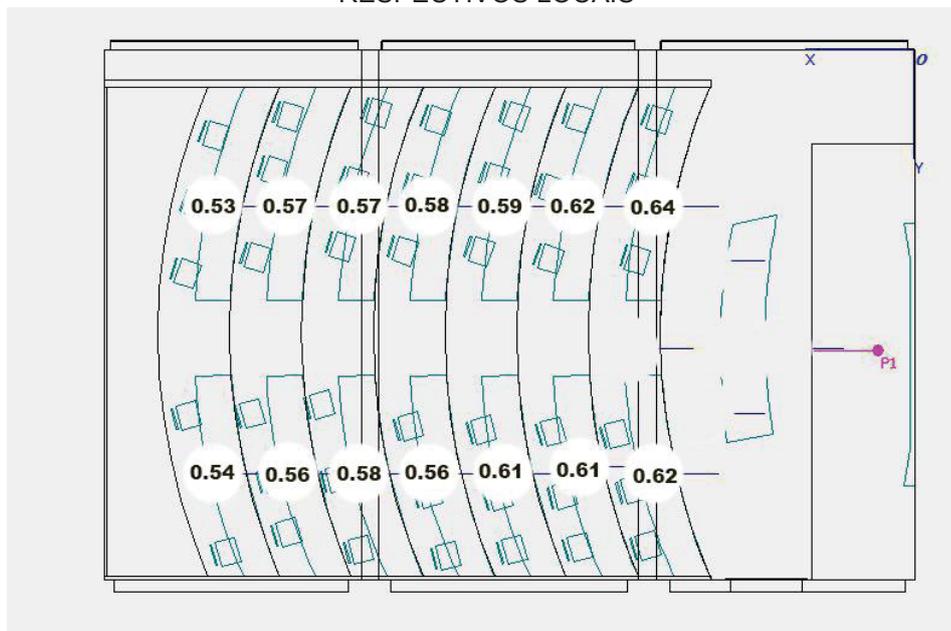
A seguir serão apresentados os dados de medição e simulação obtidos nas salas de aula do prédio construído na década de 60:

5.1.1 Sala PG03

A Figura 18 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PG03.

Uma tabela com os valores medidos e simulados nos respectivos locais de medição e o erro relativo entre os valores é encontrada no apêndice A.

FIGURA 17 – CROQUI DA SALA PG 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



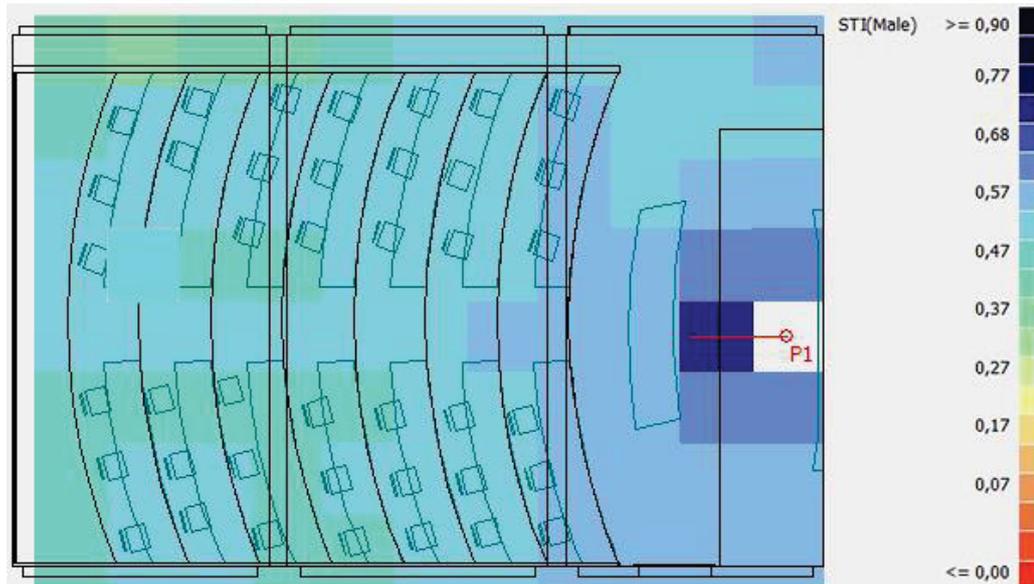
FONTE: O autor (2018)

Ao analisar as medidas do STI observa-se que a propagação do som vai diminuindo à medida que avança para o final da sala de aula, variando de 0,73 a 0,53; ou seja, a qualidade do som recebido é classificada como boa, para os ouvintes mais próximos a fonte emissora; a razoável para os ouvintes mais distantes.

A partir da terceira e quarta fileira, notou-se que o STI medido passou de bom para razoável, isto é, apresentou valores inferiores a 0,60. Porém, não chegou a apresentar valores considerados “pobres”, que são inferiores a 0,45, uma vez que o mínimo medido foi 0,53.

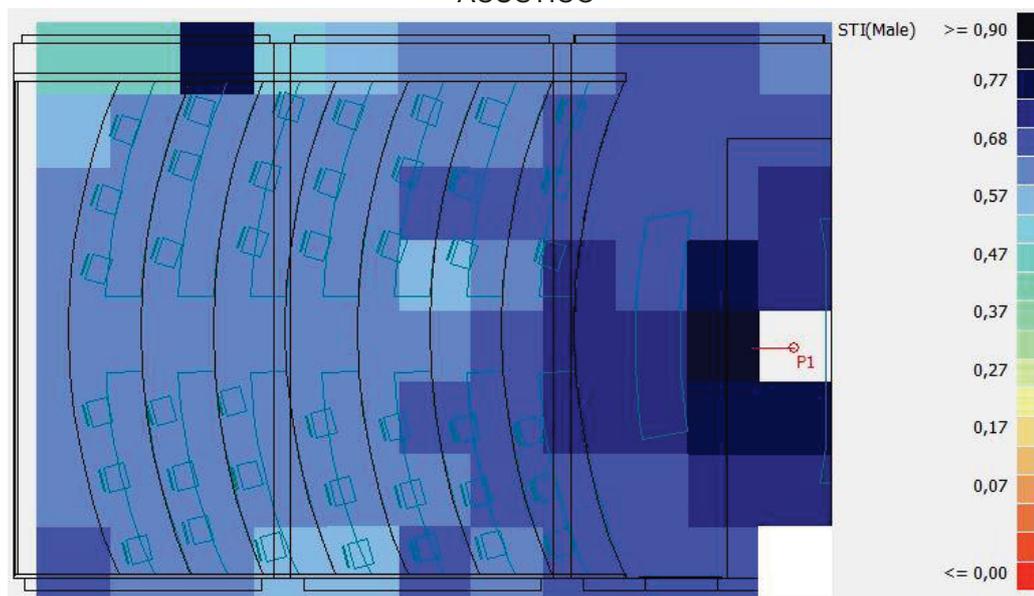
O teto acústico da PG 03 foi substituído há vários anos por um forro de PVC. Conforme avaliação acústica em salas de aula da UFPR realizada por Zannin et al (2010), o T_R da sala PG 03 passou de adequado para não adequado. A causa dessa mudança é troca do forro. Devido à relação que há entre T_R e STI, acredita-se que essa troca de forro também afetou o STI da sala negativamente, para comprovar esta relação foi simulado no ODEON 11.00 a sala com o teto acústico. As Figuras 19 e 20 mostram o STI da sala PG03 atual (com forro de PVC) e com o forro acústico.

FIGURA 18 – MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG03 COM TETO DE PVC



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 19 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG03 COM TETO ACÚSTICO

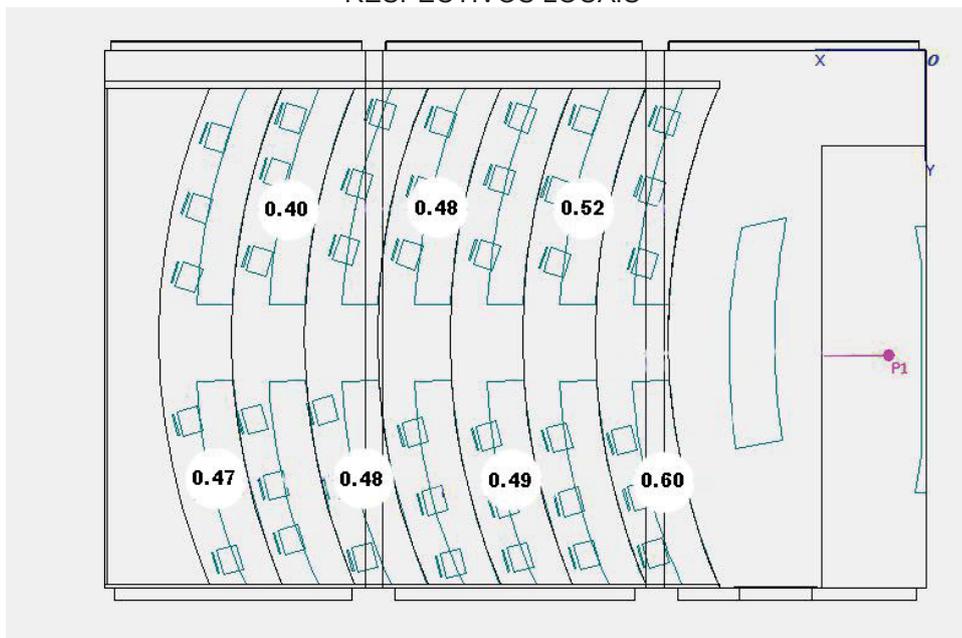


FONTE: O autor (2018)

Conforme a Figura 20 os valores de STI na modelagem com o teto acústico melhoram significativamente, trazendo a sala de aula de um valor médio de STI de 0,56 na simulação com teto de PVC, para uma classificação boa com um STI de 0.71 e nas primeiras fileiras chega a ter um STI excelente.

Os valores de D_{50} que foram medidos são apresentados na Figura 21:

FIGURA 20 - CROQUI DA SALA PG 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

O valor médio de D_{50} para a sala é de 0,50 com variações de 0,4 a 0,6. Segundo a classificação calculada por Ansay e Zannin (2016) este valor classifica a sala como razoável.

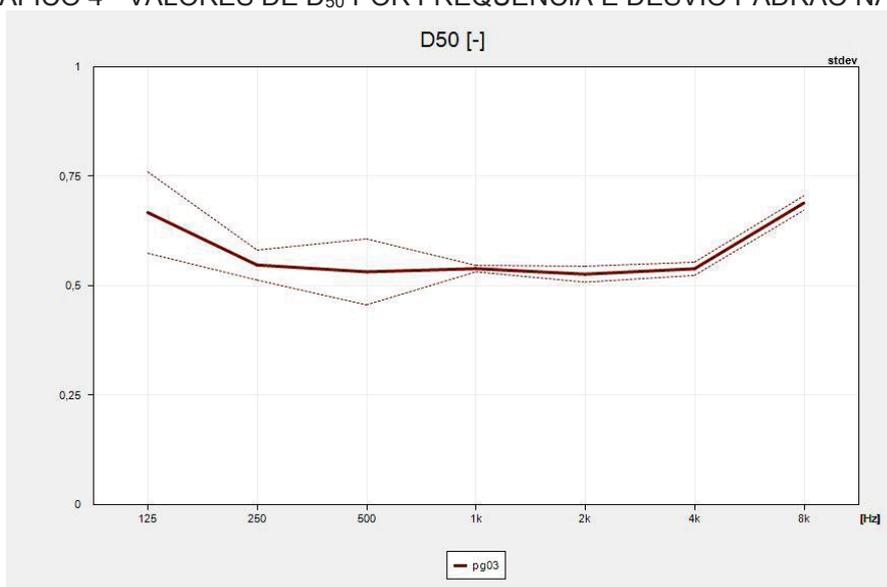
Já, segundo Fasold e Veres (2003) a sala, na média, não tem uma boa inteligibilidade apesar de estar muito próxima do valor de referência que seria acima de 0.50.

No Gráfico 5 pode-se constatar que os valores de T_R são mais altos exatamente na frequência onde o teto acústico faria uma boa absorção do som que é entre 250 e 8000 Hz, conforme verifica-se na Tabela 3.

A medição do T_R da PG 03 ficou com média de 1,15 s, valor que segundo a ANSI/ASA está fora do esperado que é de até 0,6s para salas com o volume menor que 283m^3 , nas frequências de 500Hz, 1000Hz e 2000Hz.

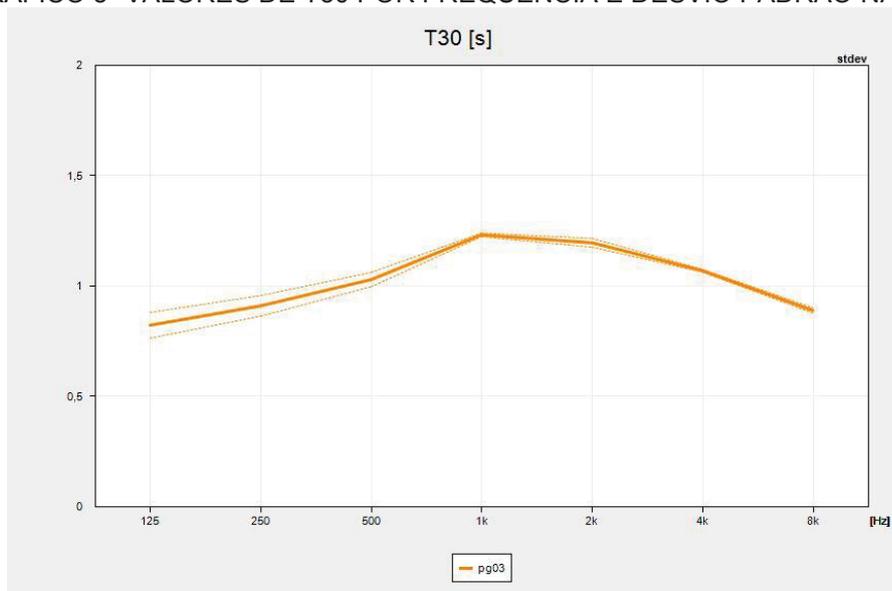
A indicação para salas de conferência, já que a norma brasileira NBR 12179/1992 não contempla salas de aula, para o volume de 133 m^3 da sala o T_R ideal é de aprox. 0,6 segundos em 500 Hz, o da PG 03 é de 1,03 s.

Conforme o Gráfico 4 há uma queda nos valores de D_{50} entre 250Hz e 4000Hz e um aumento no desvio padrão para frequências abaixo de 1000Hz. As diferenças de desvio padrão maiores significam uma diferença maior também na inteligibilidade.

GRÁFICO 4 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG03

FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 5 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG03



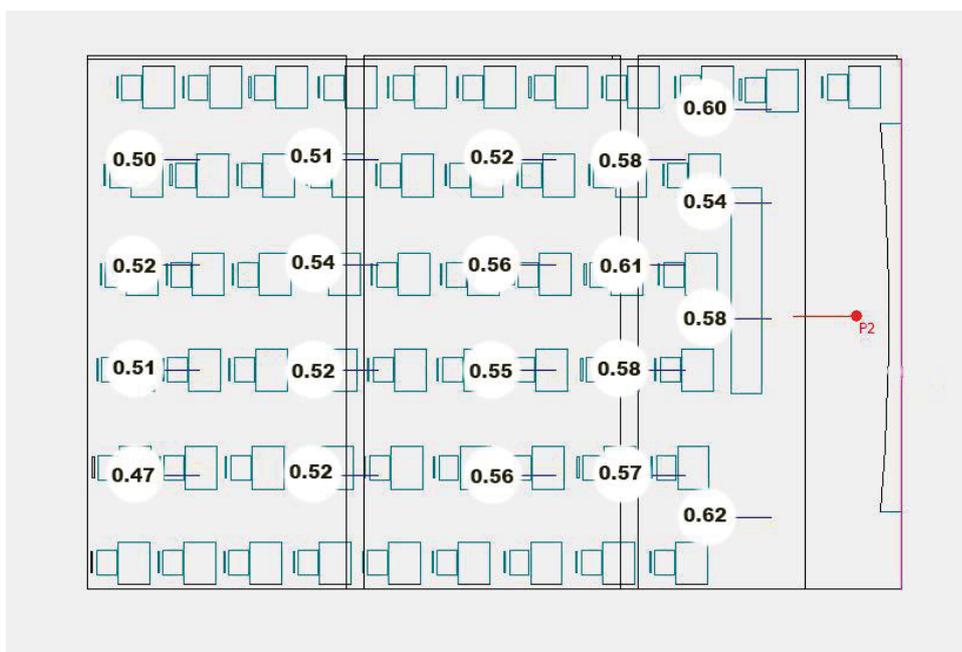
FONTE: O autor (2018)

Os valores de tempo de reverberação e D_{50} podem ser conferidos pela localização ou por frequência em Tabela que se encontra no Apêndice C.

5.1.2 Sala PG04

A Figura 22 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PG04:

FIGURA 21 - CROQUI DA SALA PG 04 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

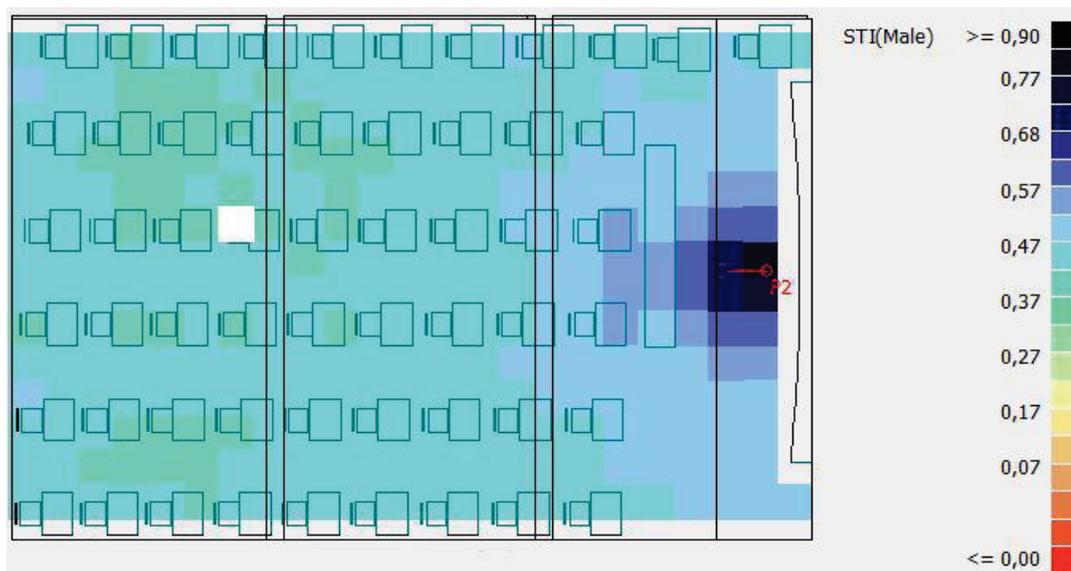
O STI medido variou de 0,62 a 0,47, novamente ficou longe da excelência, e neste caso a sala não pode sequer ser classificada como boa, pois apenas em dois pontos o STI foi superior a 0,60. A média do STI medido ficou em 0,55 o que classifica a sala como razoável segundo a ISO 9921:2003, porém o razoável, como sabido, já é prejudicial ao aprendizado.

Bem como as outras salas deste prédio, construído em 1960, o teto acústico Celotex M1 foi substituído em 2007 por um forro de PVC.

Em modelagem construída no ODEON 11.00 foi comparado a sala com o teto atual e com o teto acústico para verificar a diferença, conforme as Figuras 23 e 24 a seguir.

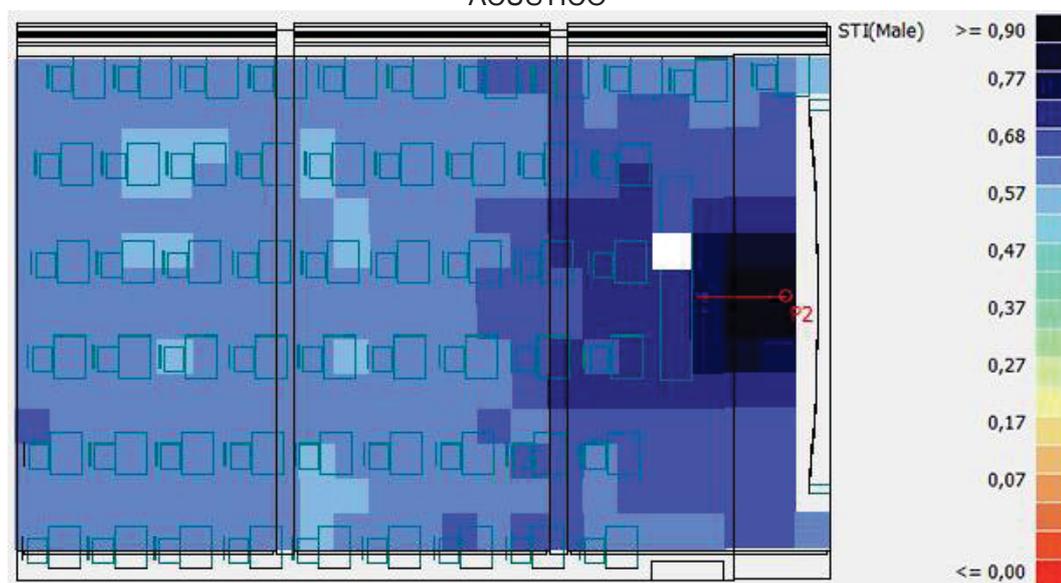
Conclui-se que a mudança de teto foi prejudicial para esta sala de aula também. Chegando a mudar a classificação do STI de bom com teto acústico onde o STI foi de 0,69 para razoável com STI de 0,53 com o teto acústico.

FIGURA 22 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG04 COM TETO DE PVC



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 23 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG04 COM TETO ACUSTICO



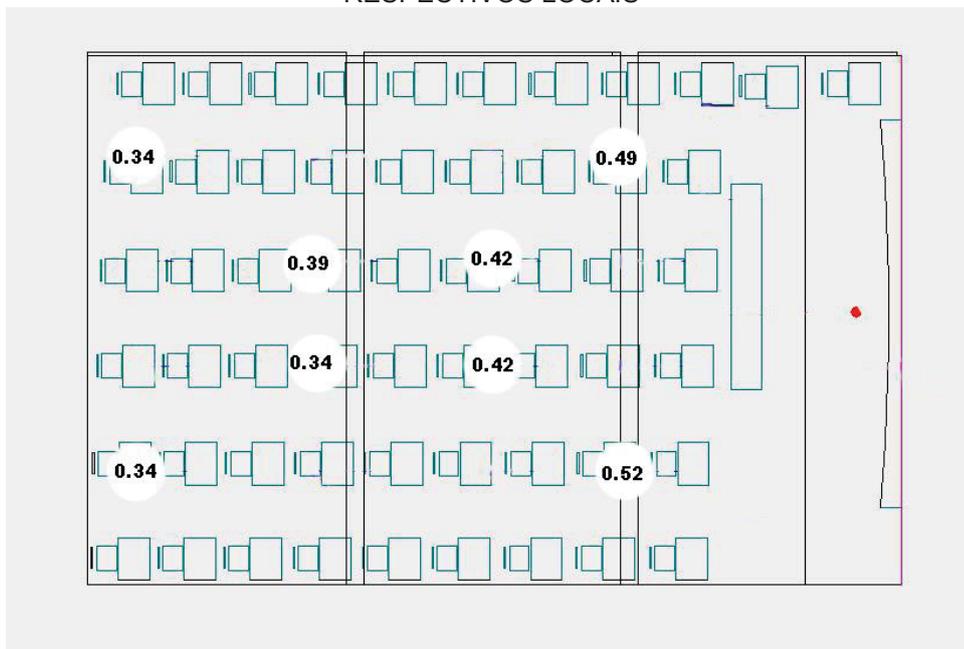
FONTE: O autor (2018)

A Figura 25 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de D_{50} e os respectivos resultados na sala PG04.

Analisado sob a ótica de Fasold e Veres (2003) a sala, na média com o valor de D_{50} em 0,41 não tem uma boa inteligibilidade.

Este valor médio de D_{50} coloca a PG 04 em uma classificação razoável de acordo com Ansay e Zannin (2016).

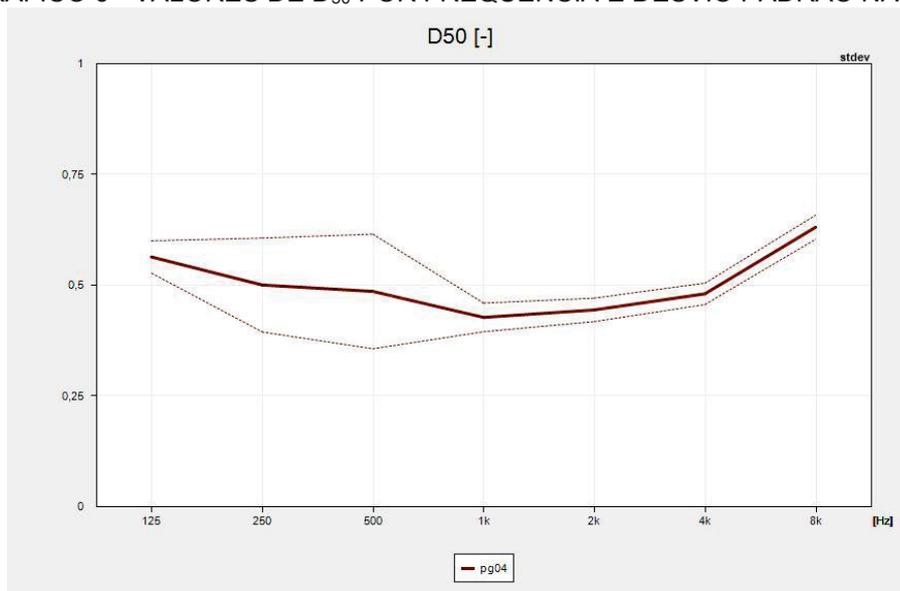
FIGURA 24 - CROQUI DA SALA PG 04 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

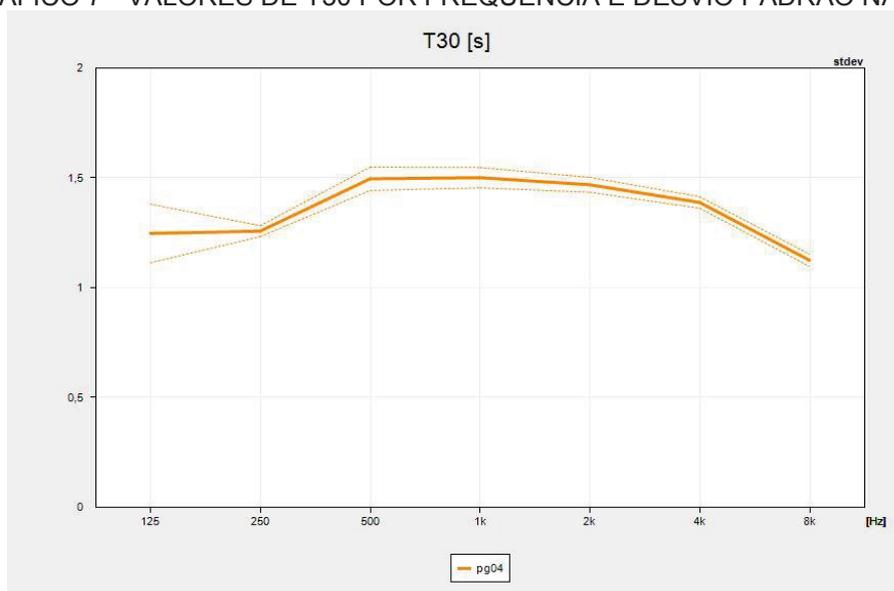
Percebe-se nos gráficos 6 e 7 abaixo, uma queda nos valores de D_{50} e de aumento de T_R nas médias frequências. O que seria melhorado, como visto na modelagem no ODEON, não tivesse sido retirado o forro acústico.

GRÁFICO 6 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG04



FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 7 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG04



FONTE: O autor (2018)

A medição do T_R da PG 04 ficou com média de 1,49 s, valor que segundo a ANSI/ASA está bem fora do esperado que é de até 0,7 s para salas com o volume entre 283 m³ e 566 m³ nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

A indicação para salas de conferência da norma NBR 12179/1992 para o volume de 286 m³ da sala, o T_R ideal é de aprox. 0,5 segundos em 500 Hz, o da PG 04 é de 1,50 s.

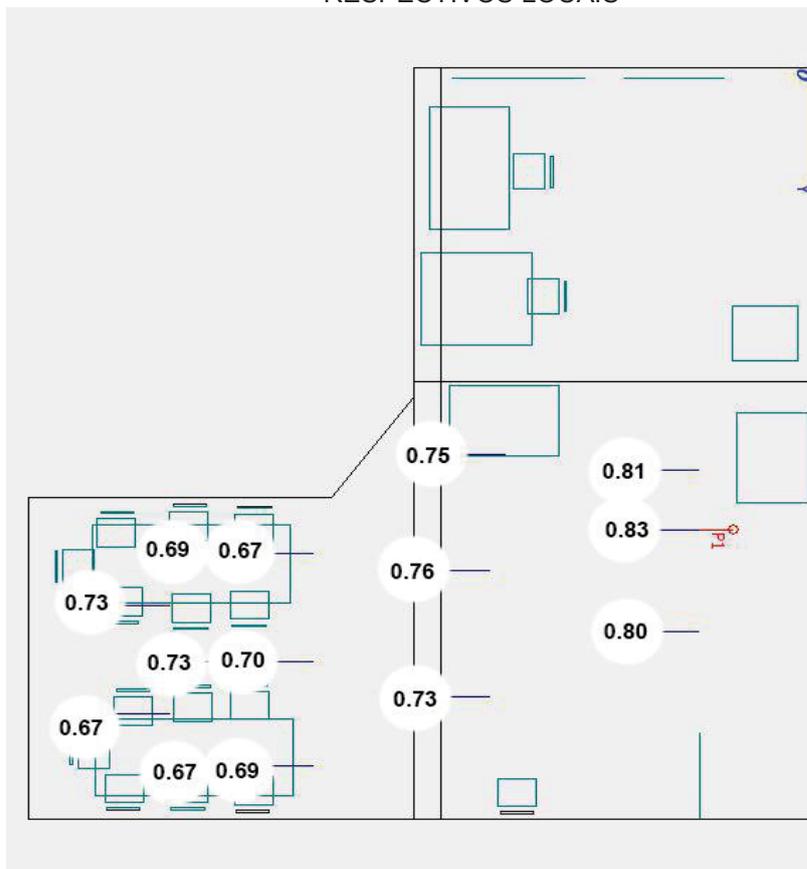
5.1.3 Sala PG05

A PG05 é a sala onde situa-se o laboratório de acústica ambiental, industrial e conforto acústico, o LAAICA, e foi uma das únicas salas onde se preservou o teto acústico.

A Figura 26 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PG05 mostrando que ela é classificada segundo a ISO 9921:2003, IEC 60268-16:2011 e ISO 3382 de boa a excelente, com um STI variando de 0,67 a 0,83 tem um STI médio de 0,74 classificando a sala como boa.

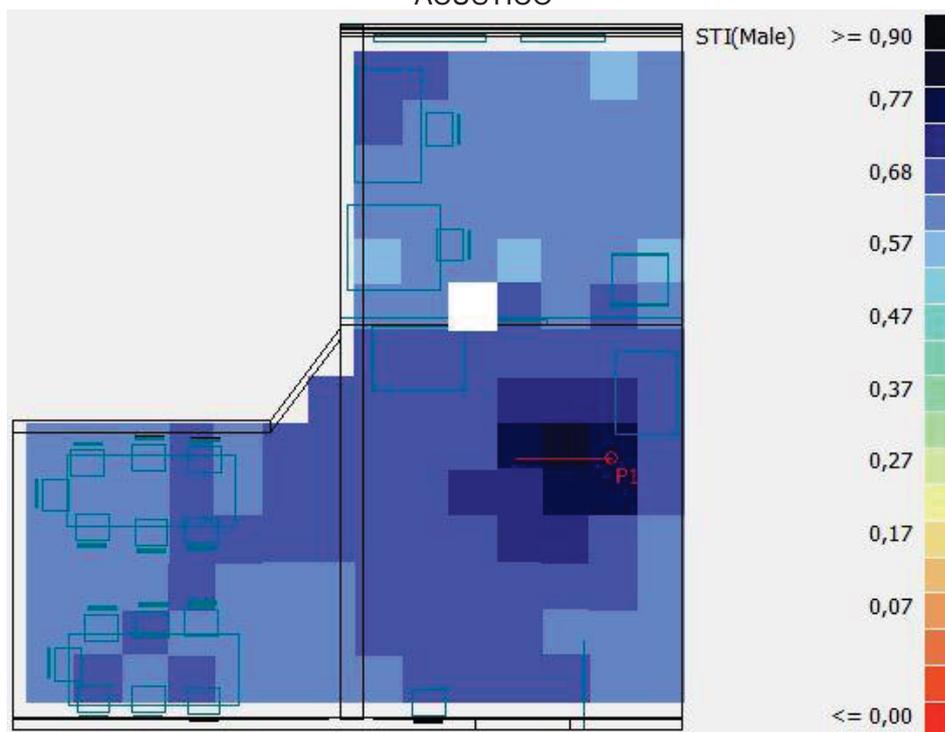
A figura 27 apresenta os valores de STI simulados no *software* ODEON 11.00.

FIGURA 25 – CROQUI DA SALA PG 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

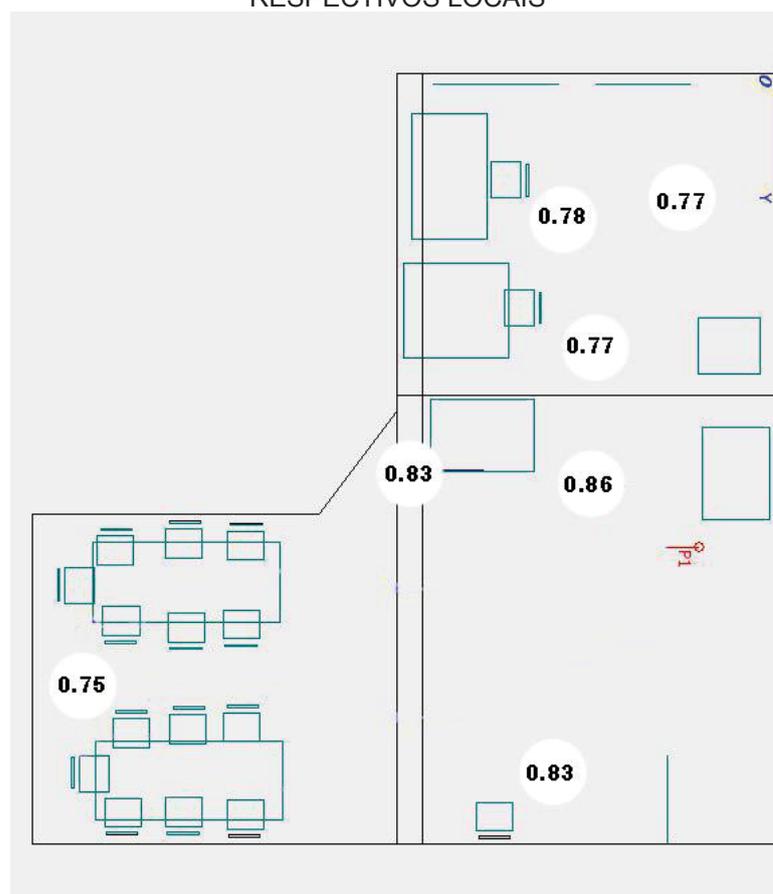
FIGURA 26 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG05 COM TETO ACUSTICO



FONTE: O autor (2018)

A Figura 28 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de D_{50} e os respectivos resultados na sala PG05 mostrando um valor quantitativo entre 0,75 e 0,86, com média 0,82, sendo interpretado como bom pela Quadro 1, proposta por (ANASAY e ZANNIN 2016).

FIGURA 27 – CROQUI DA SALA PG 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

Os gráficos 8 e 9 mostram os valores de D_{50} e T_R respectivamente com seus desvios padrão.

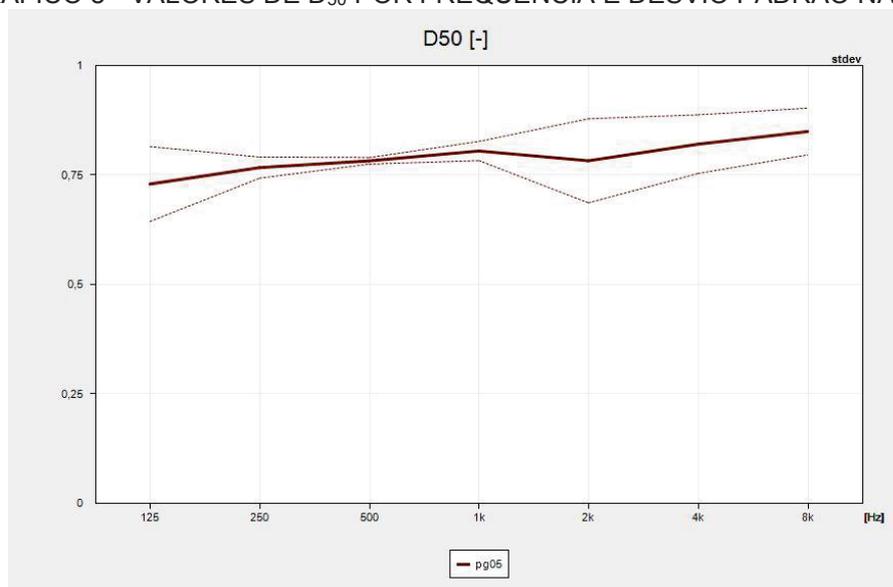
A medição do T_R da PG 05 ficou com média de 0,51 s, valor que segundo a ANSI/ASA está dentro do esperado que é de até 0,6 s para salas com volume até 283 m^3 em 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Para salas de conferência, segundo a NBR 12179/1992 no volume de 133 m^3 da sala o T_R ideal é de aprox. 0,5 segundos para 500Hz, o da PG 05 é de 0,53, ou seja, a sala está em conformidade com o valor ótimo recomendado pela norma brasileira.

Os valores de tempo de reverberação podem ser conferidos por ponto ou por

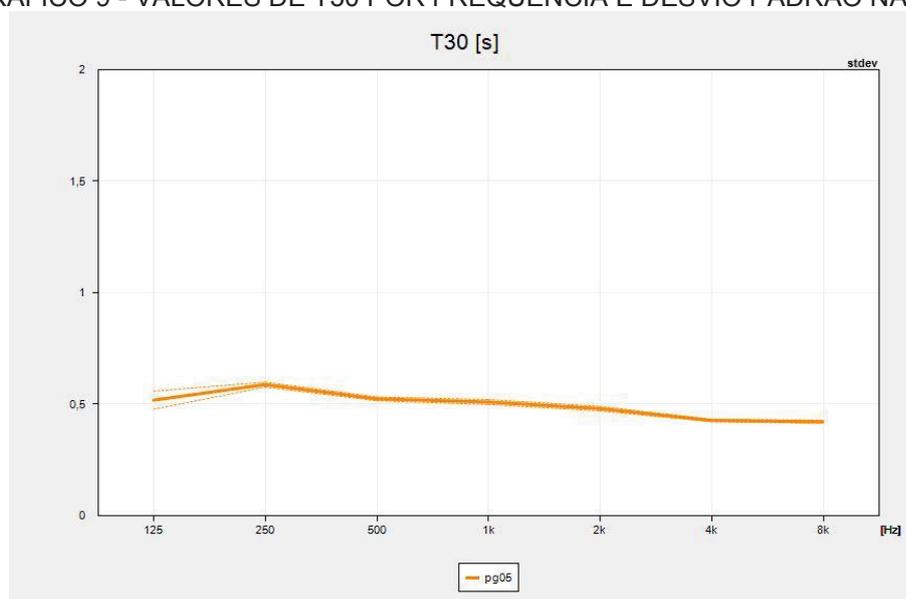
frequência em Tabela que se encontra no Apêndice C.

GRÁFICO 8 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG05



FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 9 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG05

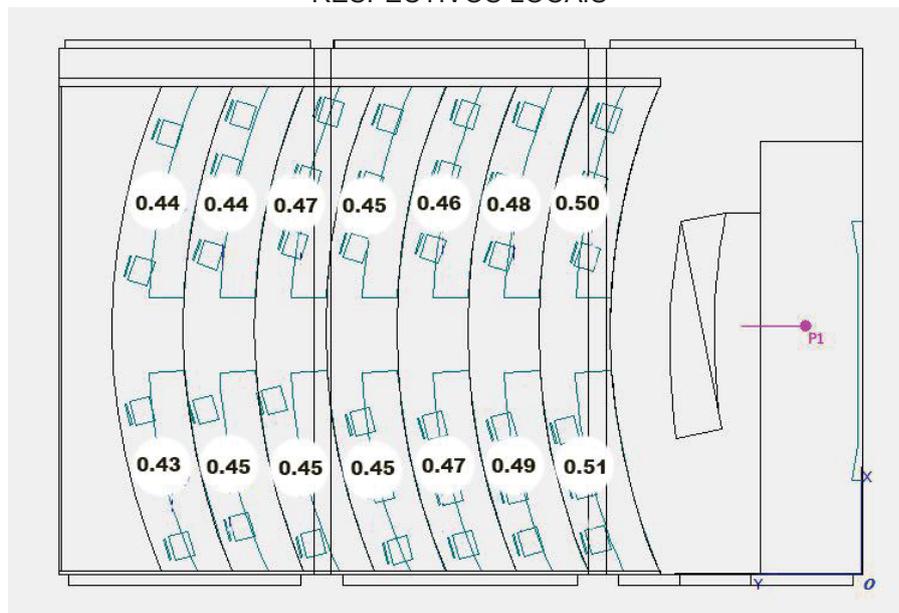


FONTE: O autor (2018)

5.1.4 Sala PG06

A Figura 29 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PG06:

FIGURA 28 – CROQUI DA SALA PG 06 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS

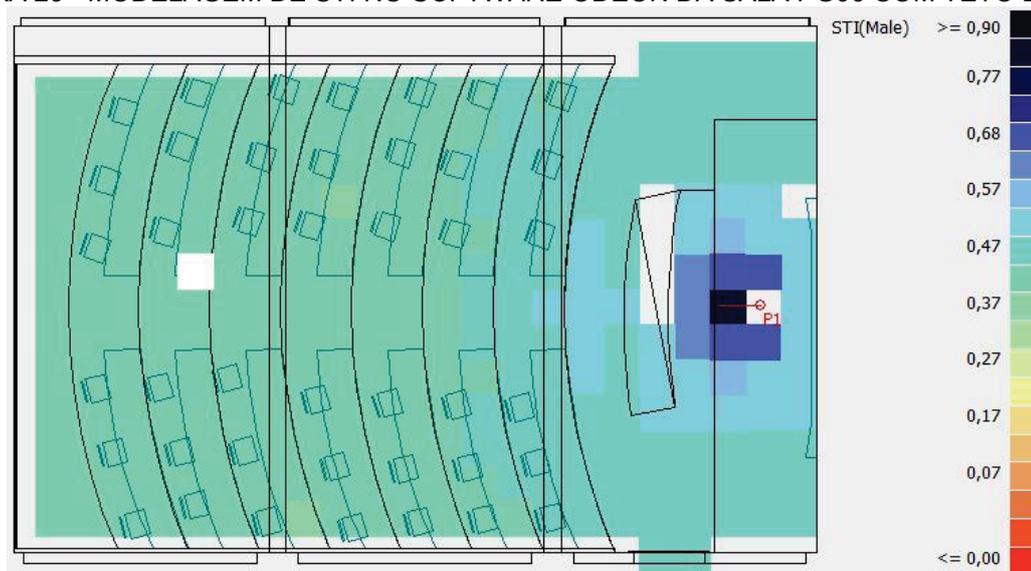


FONTE: O autor (2018)

A sala PG06 conforme sua estrutura atual, que leva teto de PVC, tem um STI médio de 0,46 que segundo a ISO 9921:2003, apresentado no Quadro 2, fica qualificada como razoável.

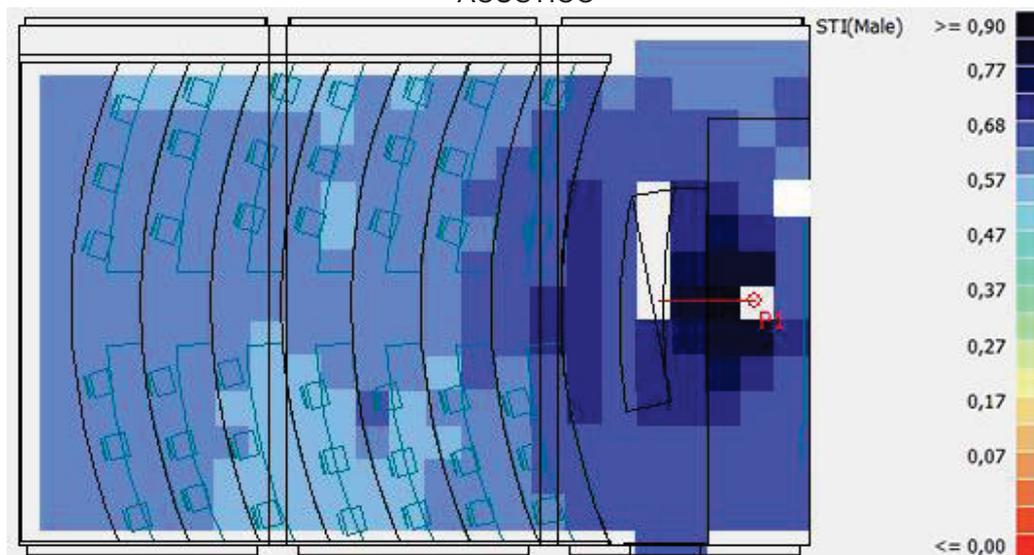
As Figuras 30 e 31 mostram o STI da sala PG06 atual (com forro de PVC) e com o forro acústico respectivamente.

FIGURA 29 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG06 COM TETO DE PVC



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 30 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG06 COM TETO ACÚSTICO

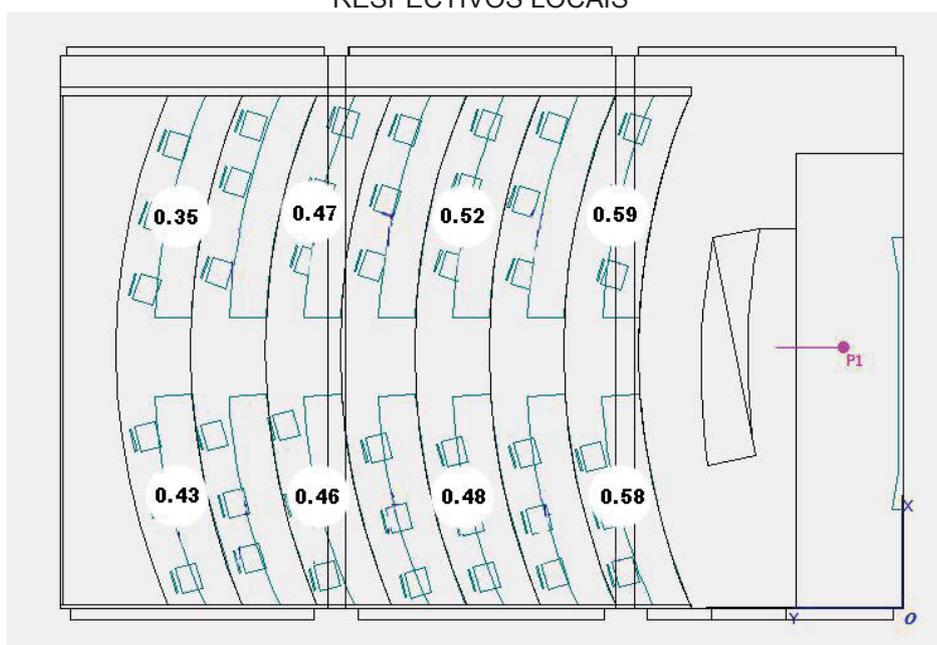


FONTE: O autor (2018)

Conforme as figuras 30 e 31 o nível de STI aumenta de 0,48 para um valor qualitativo bom, variando entre 0,66 e 0,70 com média de 0,67, ao simular as medidas com o teto acústico Celotex M1.

Os valores de D_{50} que foram medidos são apresentados na Figura 32:

FIGURA 31 - CROQUI DA SALA PG 06 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

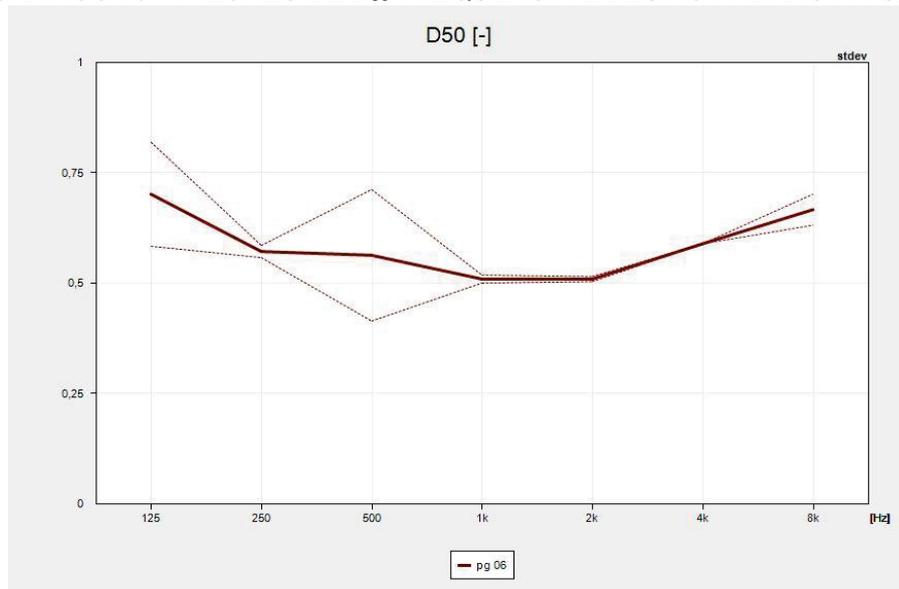
De acordo com Fasold e Veres (2003) a PG06, que tem na média um valor de

D_{50} em 0,48 não tem uma boa inteligibilidade.

Este valor de D_{50} coloca a PG 06 em uma classificação razoável de acordo com Ansay e Zannin (2016).

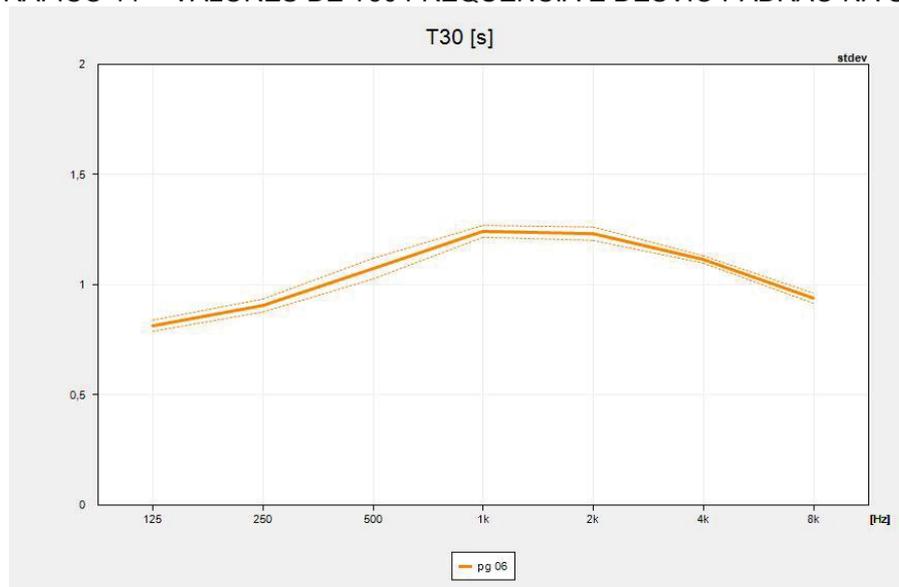
Há uma queda nos valores de D_{50} nas médias frequências, o que seria melhorado, com o uso do forro acústico.

GRÁFICO 10 - VALORES DE D_{50} FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG06



FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 11 - VALORES DE T30 FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG06



FONTE: O autor (2018)

Nos Gráficos 10 e 11 podemos verificar que o tempo de reverberação aumenta nas

médias frequências pelo mesmo motivo da diminuição do D_{50} .

A PG06 não atende a ANSI/ASA pois para o volume de 330 m^3 ela deveria ter um T_R de 0,7 s em 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz e tem 1,19 s. Também não atende como sala de conferência pela NBR 12179(1992) que pede 0,6 s em 500 Hz e a sala tem 1,08.

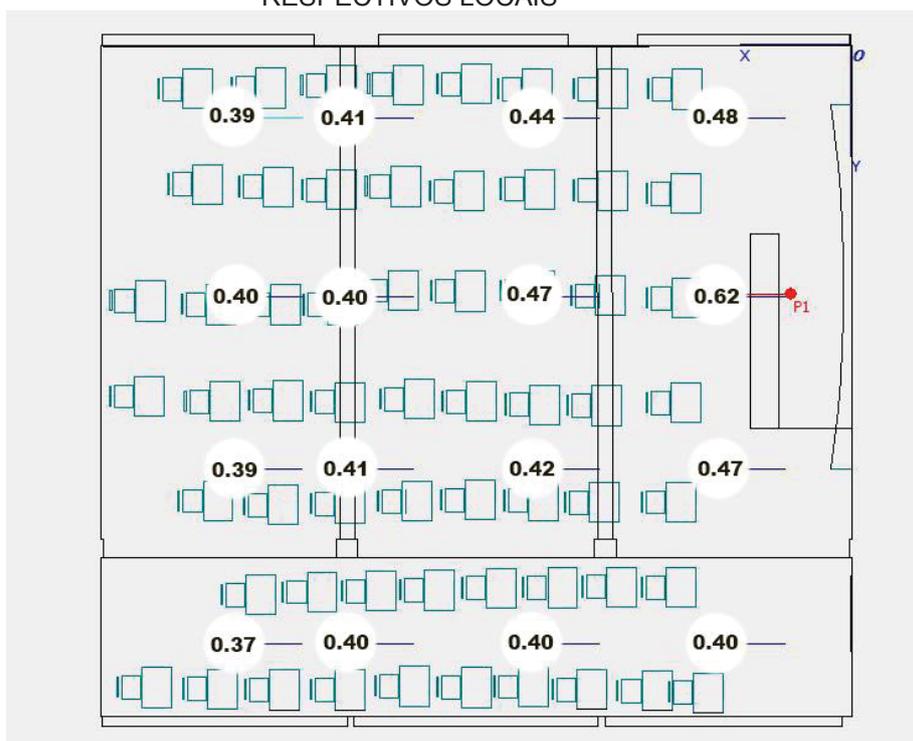
5.1.5 Sala PG07

A Figura 33 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PG07, onde a média é 0,43 que define a sala qualitativamente como pobre na ISO 9921:2003.

Somente o ponto de medição exatamente em frente ao local no meio do tablado da sala, simulando o aluno que senta à frente da sala e do professor teria uma boa inteligibilidade, todo o remanescente fica com inteligibilidade de razoável a pobre.

A PG07 é a sala com o pior valor de STI das dez avaliadas. O formato com colunas e o forro de PVC, que foi colocado posteriormente ajudam muito nesta péssima acústica.

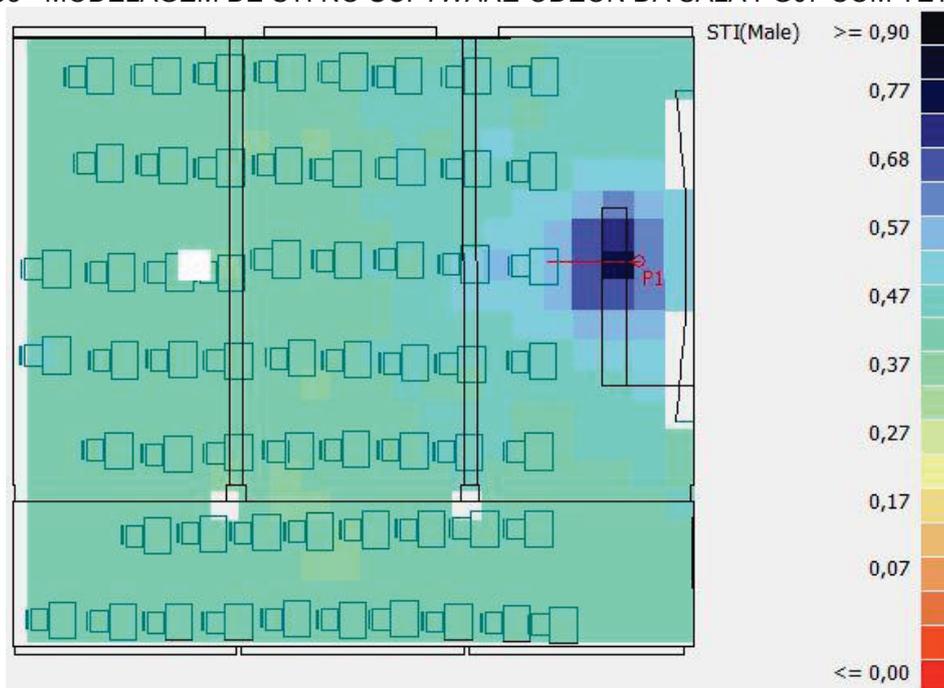
FIGURA 32 – CROQUI DA SALA PG 07 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

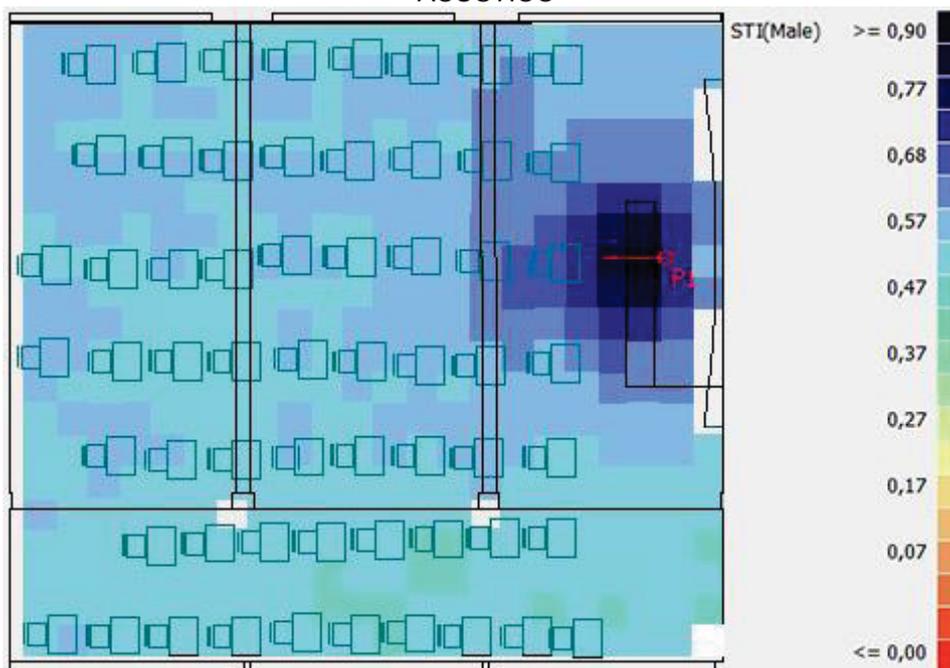
Já na modelagem em ODEON, conforme as Figuras 34 e 35, novamente fica comprovada a eficiência de um bom forro acústico, pois a sala passaria a ter um STI de 0,61 o que a classificaria segundo a ISO 9921:2003 como boa.

FIGURA 33 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG07 COM TETO DE PVC



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 34 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG07 COM TETO ACÚSTICO

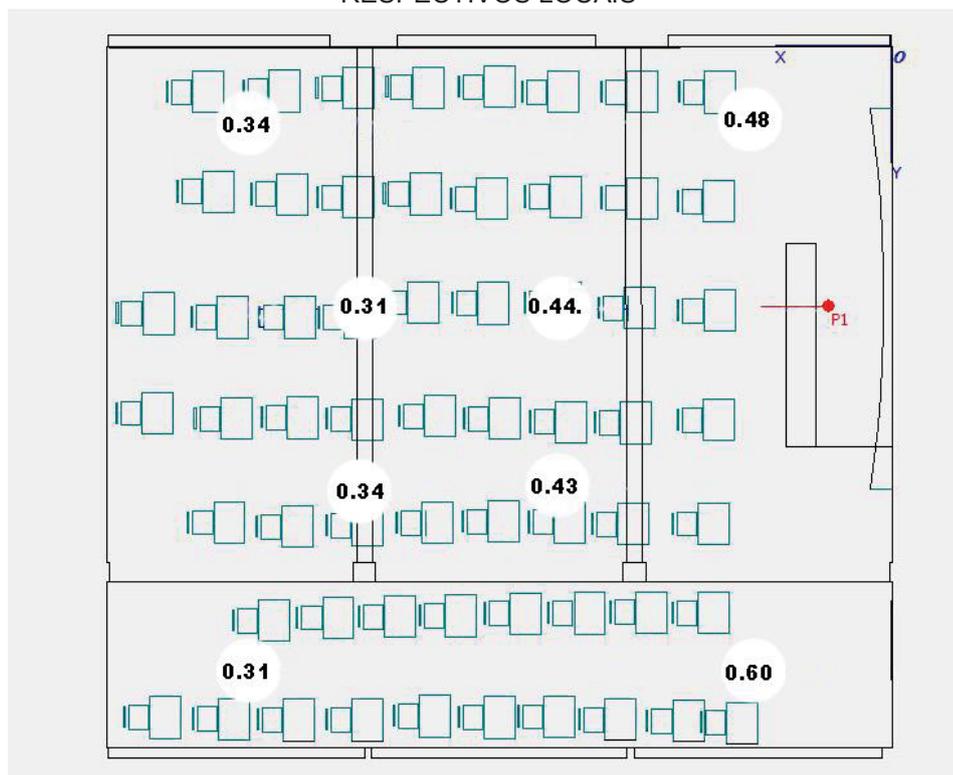


FONTE: O autor (2018)

A Figura 36 com os valores de D_{50} variando entre 0,31 e 0,60, com uma média de 0,41 nos mostra que a sala se classifica como razoável a pobre de acordo com Ansay e Zanin (2006) em congruência com os valores qualitativos de STI.

Os valores de D_{50} não atendem boa inteligibilidade conforme Fasold também.

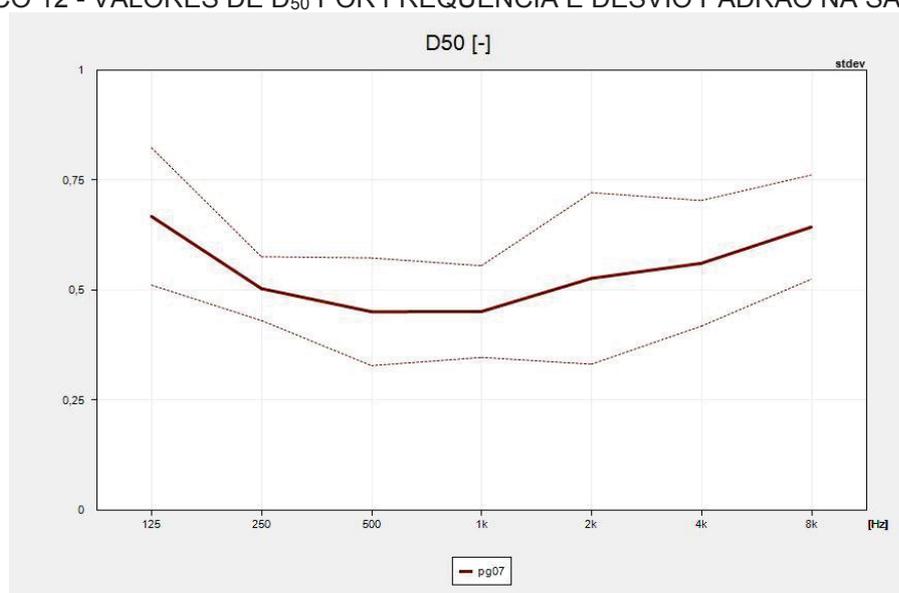
FIGURA 35 - CROQUI DA SALA PG 07 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

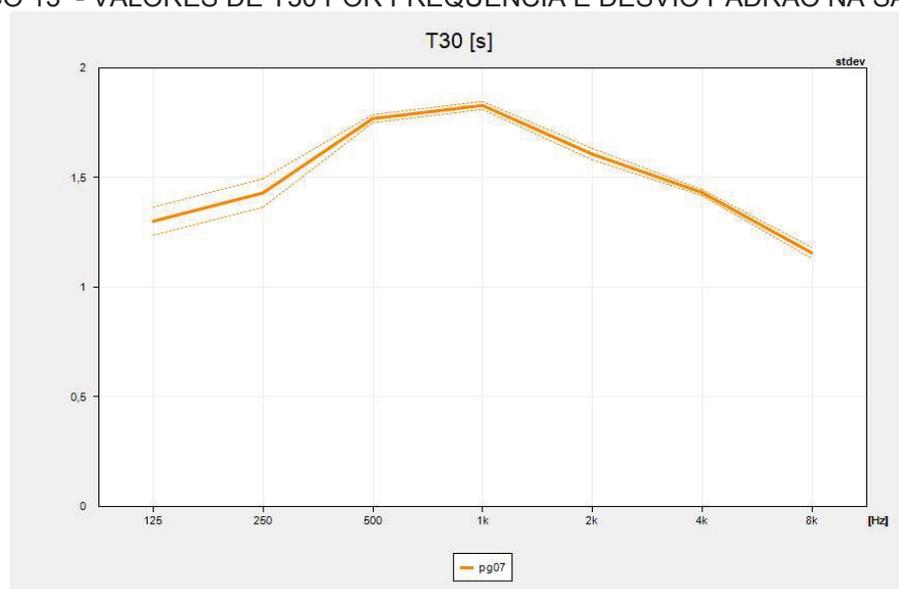
O Gráfico 12 mostra que há uma baixa de D_{50} nas frequências médias. Isso seria facilmente melhorado com a volta do forro acústico que foi retirado da sala.

O T_R da sala PG07, no Gráfico 13, entre 500 Hz e 2000 Hz fica em 1,73 s totalmente fora da ANSI/ASA onde deveria ter 0,7 s. Não atende também a NBR 12179 pois tem 1,76 s contra os 0.6s que deveria ter para atender a uma sala de conferência.

GRÁFICO 12 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG07

FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 13 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG07

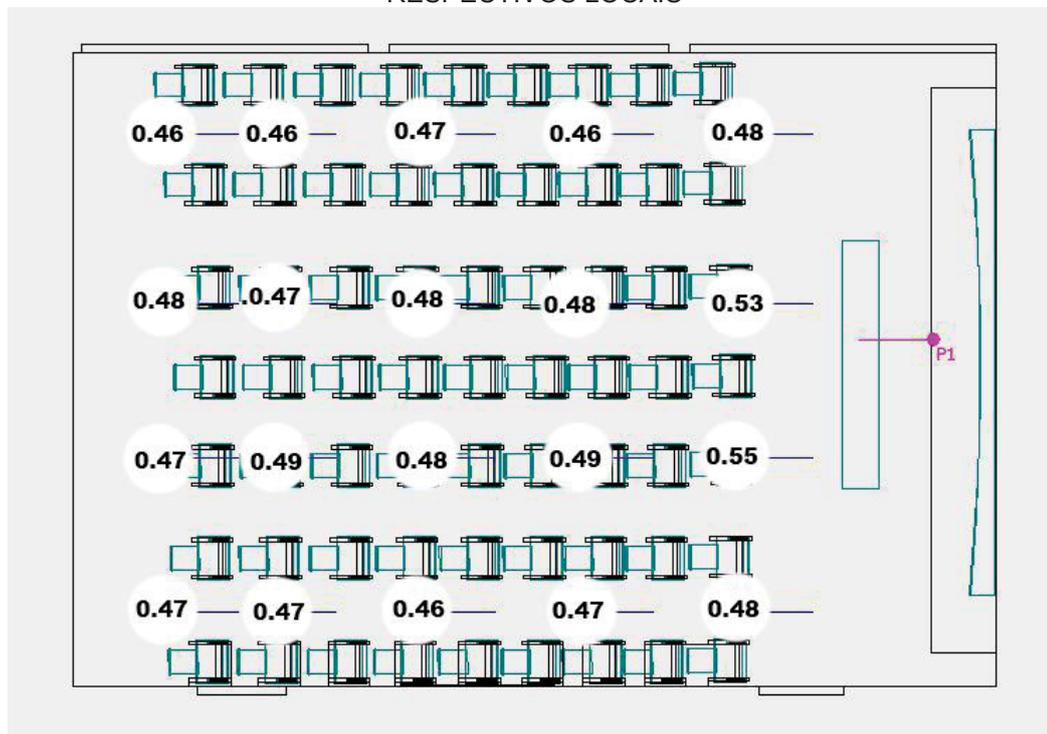


FONTE: O autor (2018)

5.1.6 Sala PG15

A Figura 37 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PG15:

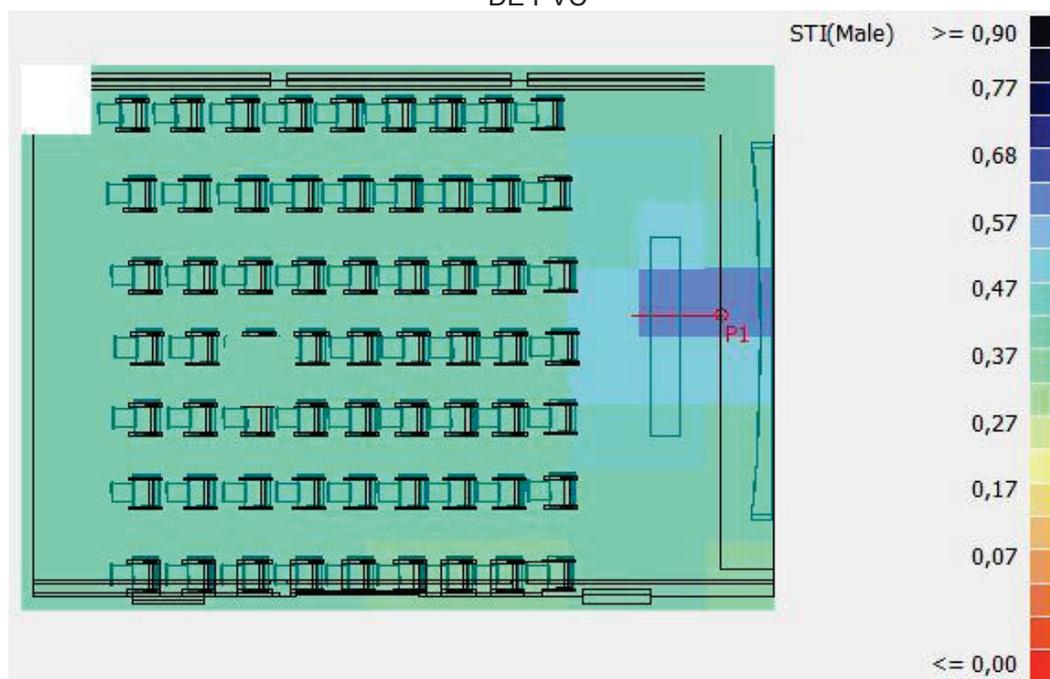
FIGURA 36 – CROQUI DA SALA PG 15 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

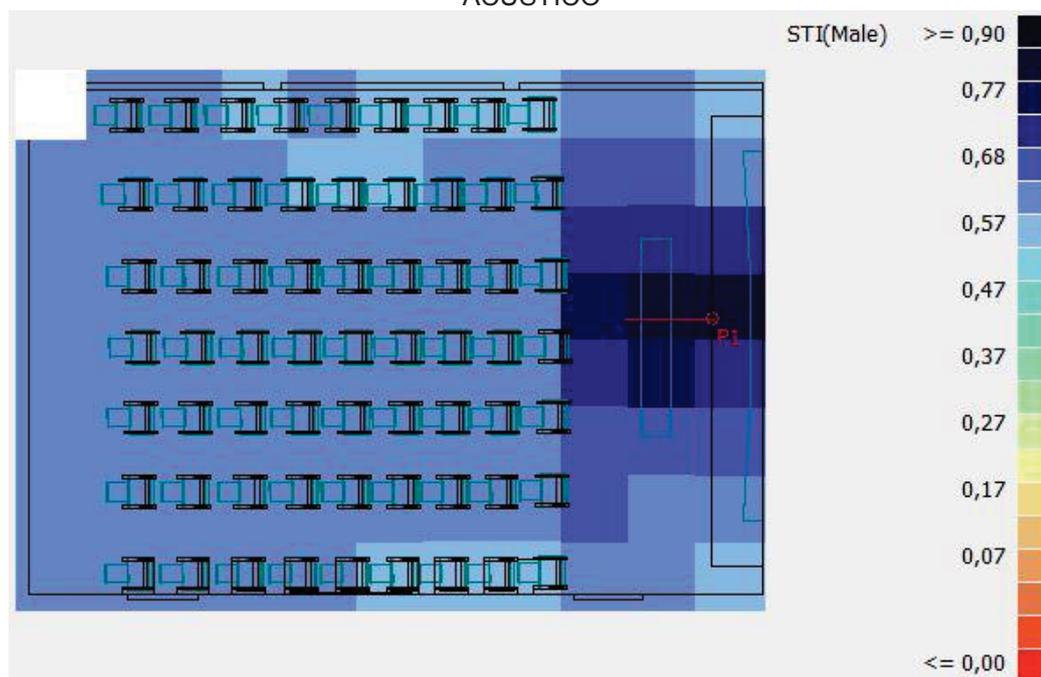
Na média o valor de STI é de 0,48 classificando a inteligibilidade da sala como razoável. Vale lembrar que este valor de STI está muito próximo do pobre: 0,45.

FIGURA 37 – MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA NA SALA PG15 COM TETO DE PVC



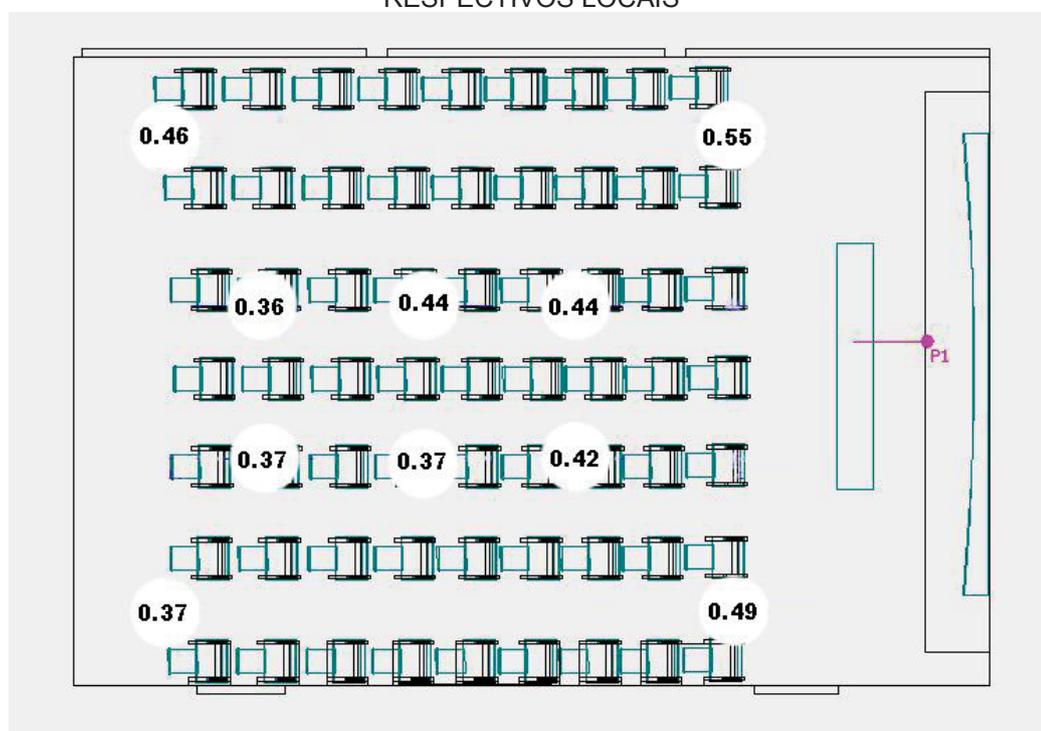
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 38 – MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PG15 COM TETO ACÚSTICO



FONTE: O autor (2018)

FIGURA 39 – CROQUI DA SALA PG 15 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



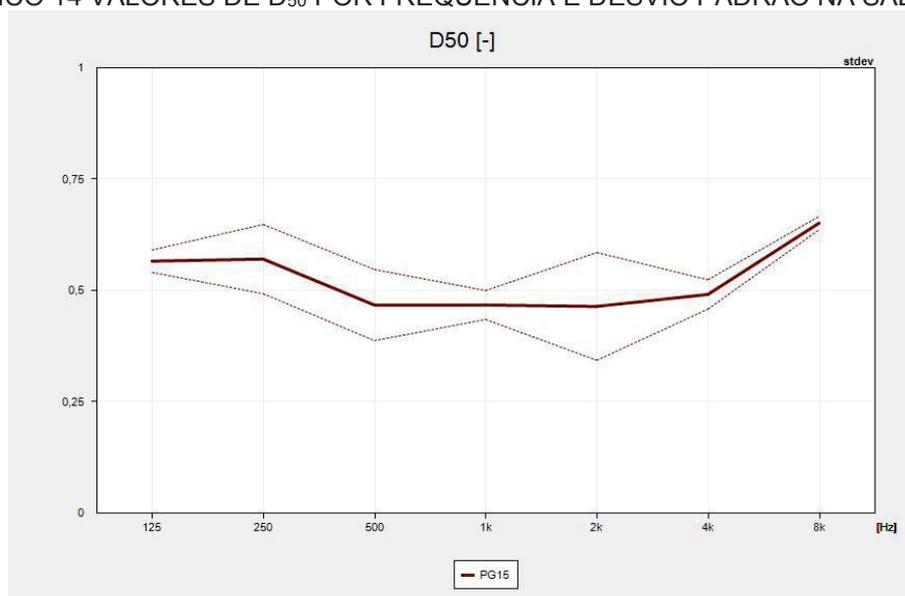
FONTE: O autor (2018)

Novamente pode-se observar, de acordo com a figura 39, que o teto acústico

muda completamente a performance da sala, colocando-a com um STI na faixa do bom, com valor médio de 0,68.

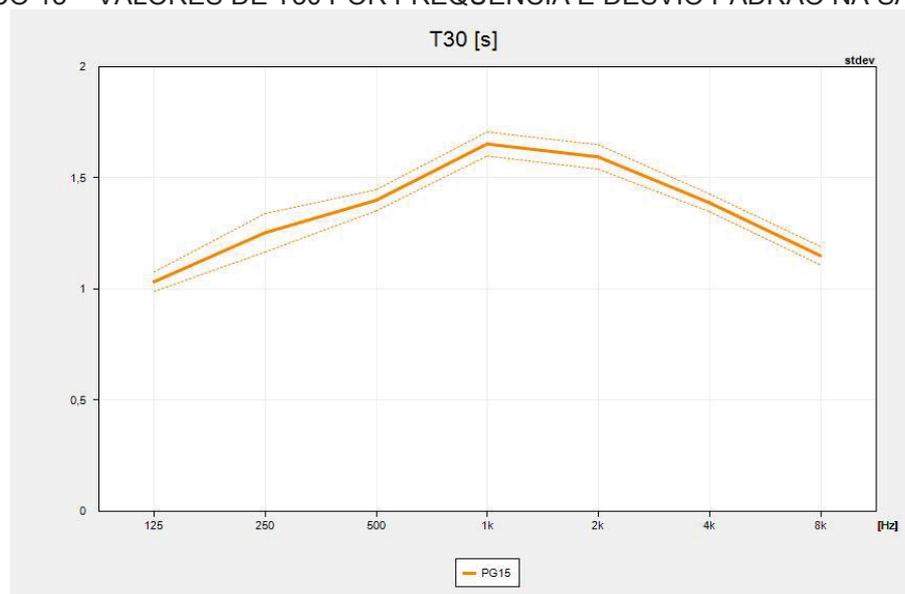
Na PG15 os valores de D_{50} estão dentro de uma faixa de inteligibilidade razoável conforme o índice de inteligibilidade proposto por Ansay e Zannin (2016), com uma média de 0,44. Porém não atenderia a Fasold e Veres (2003) pois fica abaixo de 0,50.

GRÁFICO 14 VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG15



FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 15 – VALORES DE T_{30} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PG15



FONTE: O autor (2018)

O tempo de reverberação de 1,5 s, segundo a ANSI/ASA está totalmente fora do esperado que é de 0,7 s para o volume maior que 283 m³ para frequências de 500, 1000 e 2000 Hz.

Levando em conta ambiente usado com finalidade de sala de conferência, segundo a NBR 12179/1992, conforme Gráfico 2, para volume da sala de 285 m³ o T_R ideal é de aproximadamente 0,6 segundos em 500 Hz, sendo o da PG 15 1,4 segundos.

A tabela no Apêndice C tem os valores de tempo de reverberação medidos nas salas de aula.

5.2 SALAS DO PREDIO DE EXATAS: PA01, PA03, PA05, PA06

O prédio de Ciências Exatas da UFPR fica localizado no Centro Politécnico e foi edificado em 2016.

Todas as salas em questão foram concebidas com o mesmo tipo de material construtivo. Quadro negro com moldura em madeira e face em fórmica, carteiras e cadeiras com superfícies em fórmica, piso vinílico, teto acústico da empresa Knauf AMF, do modelo Thermatex Star SK com 15 mm de espessura, janelas de alumínio, e cortinas de tecido com PVC.

TABELA 4 - VALORES DE ABSORÇÃO DO TETO ACUSTICO THERMATEX STAR SK

MATERIAL	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz	8000 Hz
Teto acústico Thermatex	0,05	0,05	0,04	0,55	0,65	0,45	0,45

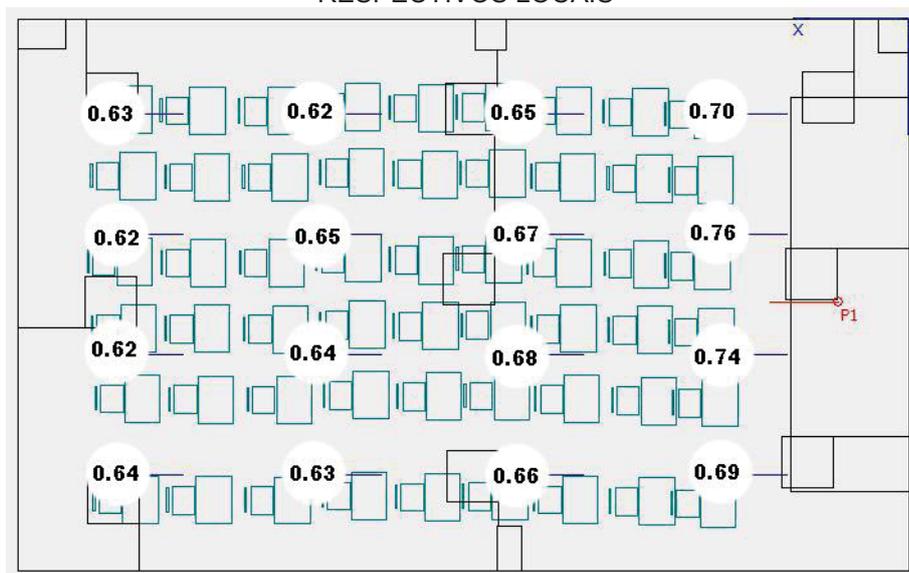
FONTE: Knauf AMG (2016)

5.2.1 Sala PA 01

O valor médio do STI medido na sala PA01 é de 0,66 o que a classifica como boa segundo a ISO 9921:2003.

A Figura 41 apresenta os pontos onde foram efetuadas as medições de STI e os respectivos resultados na sala PA01.

FIGURA 40 - CROQUI DA SALA PA 01 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS

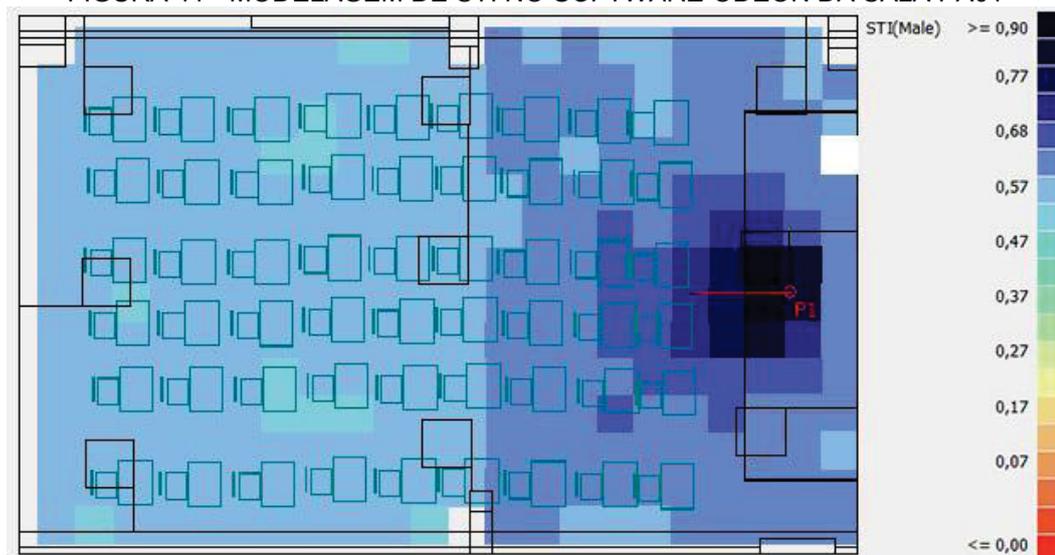


FONTE: O autor (2018)

Não foi feita simulação com mudanças de material, pois a sala já tem uma inteligibilidade boa e não precisa de mudança ou adequação.

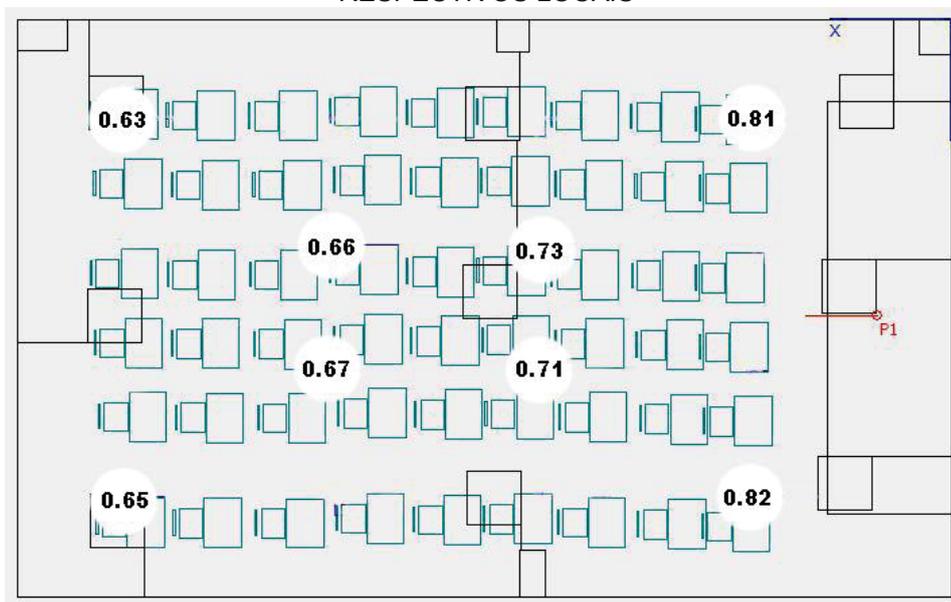
A Figura 42 mostra a simulação em ODEON da sala, onde pode-se observar a influência das largas colunas no STI na parte detrás da sala.

FIGURA 41 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PA01



FONTE: O autor (2018)

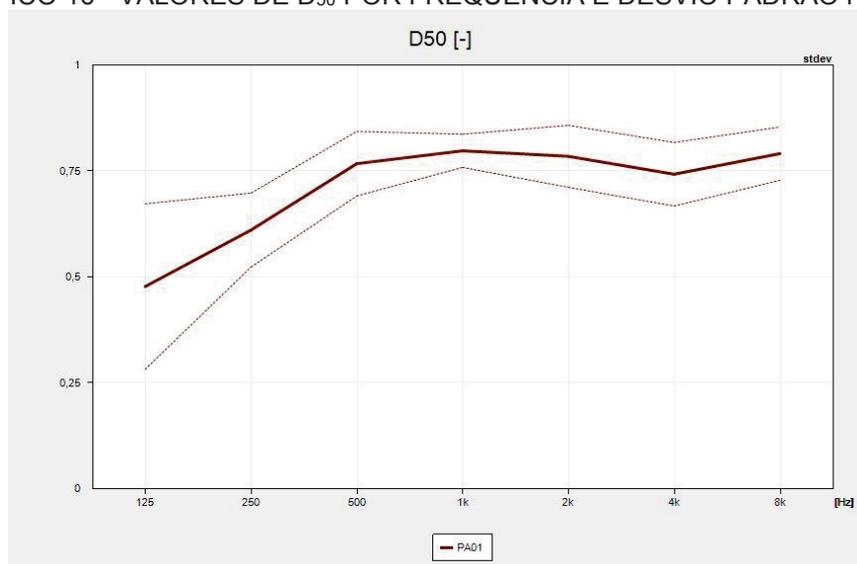
FIGURA 42 - CROQUI DA SALA PA 01 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

O valor de D_{50} médio medido na sala é de 0,7 atendendo Fasold e Veres (2003) e classificando com uma inteligibilidade boa de acordo com o calculado por Ansay e Zannin (2016). Os valores de D_{50} medidos, podem ser vistos por frequência no gráfico 16.

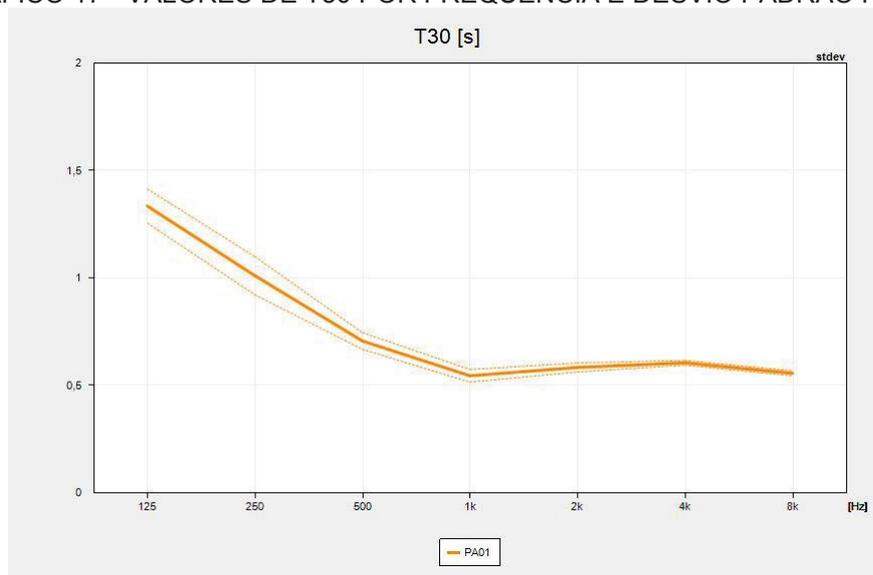
GRÁFICO 16 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA 01



FONTE: O autor (2018)

O T_R médio da PA01 nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz é de 0,6 segundos atendendo a especificação da ANSI/ASA. Atende também a NBR 12179 como sala de conferência pois tem 0,7 s em 500 Hz onde deveria ter aproximadamente 0,7. O gráfico 17 mostra os valores de T_R por frequência.

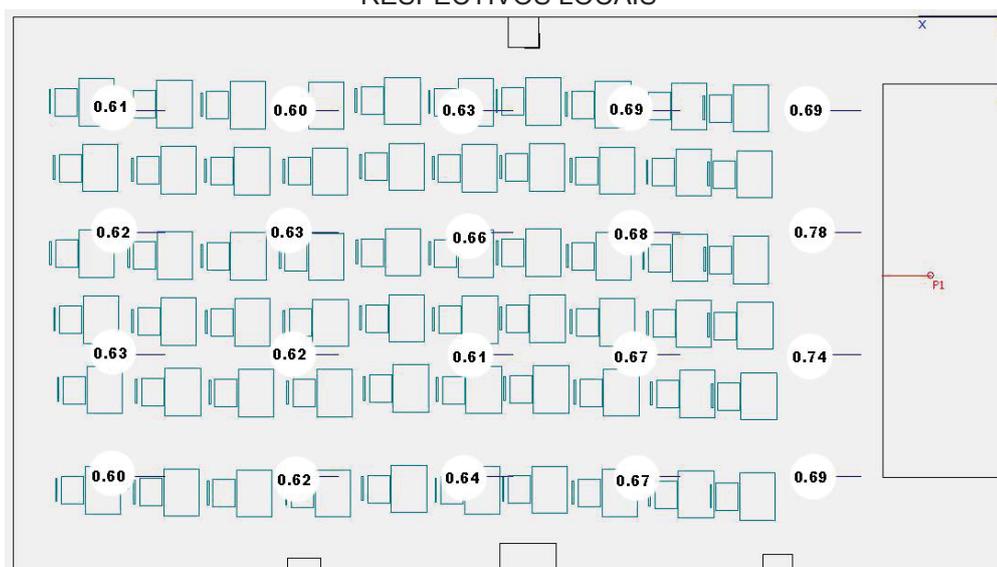
GRÁFICO 17 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA01



FONTE: O autor (2018)

5.2.2 Sala PA 03

FIGURA 43 - CROQUI DA SALA PA 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



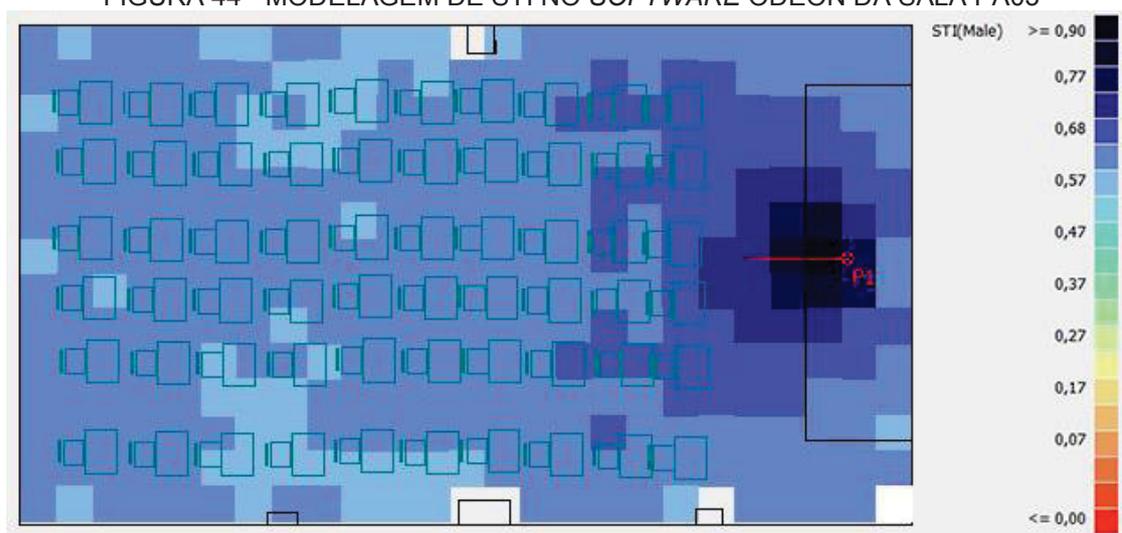
FONTE: O autor (2018)

A Figura 44 mostra os pontos e as medições de STI e os respectivos resultados na sala PA03.

O valor médio do STI que medido na sala PA03 é de 0,65 o que a classifica como boa segundo a ISO 9921:2003.

A Figura 45 mostra a simulação em ODEON da sala, onde se observa a boa inteligibilidade na sala.

FIGURA 44 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PA03

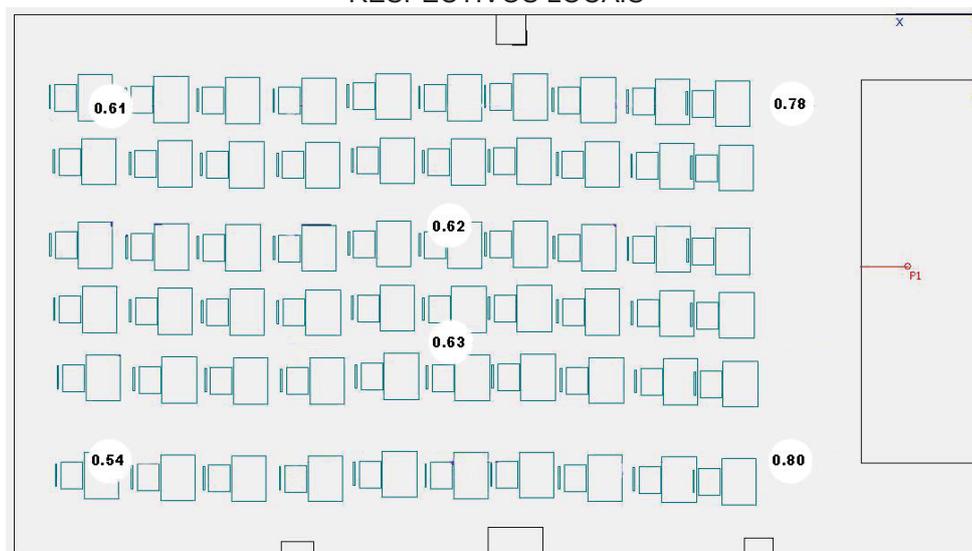


FONTE: O autor (2018)

Os valores de D_{50} , na sala PA 03, que foram medidos são apresentados na Figura 46.

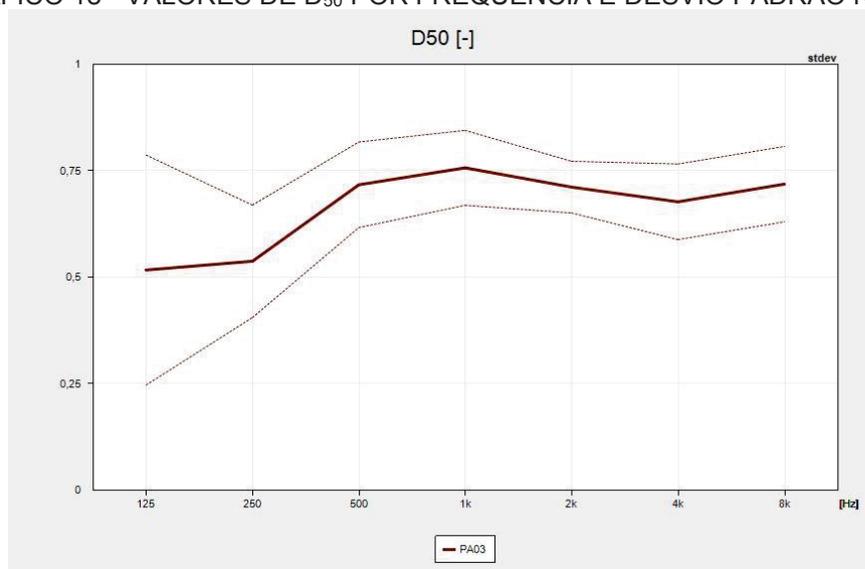
Conforme o Gráfico 18 há um aumento nos valores de D_{50} entre 250Hz e 4000Hz. As diferenças de desvio padrão significam uma diferença também na inteligibilidade, por exemplo em 125 Hz o D_{50} variou de 0,18 até 0,8.

FIGURA 45 - CROQUI DA SALA PA 03 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

GRÁFICO 18 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA03

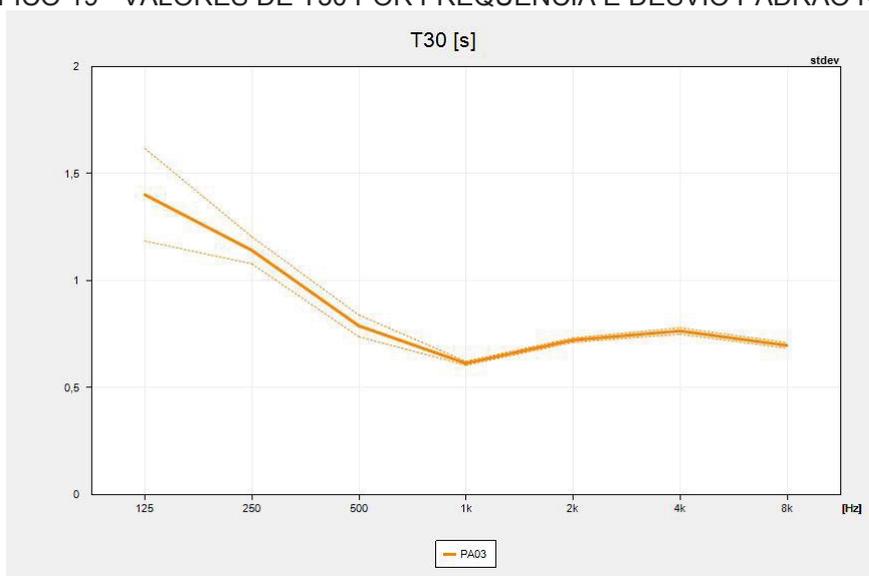


FONTE: O autor (2018)

O T_R médio da PA03 nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz é de 0,7 segundos não atendendo a especificação da ANSI/ASA. Também não atende a NBR 12179 como sala de conferência, pois tem 0,79 s em 500 Hz onde deveria ter aproximadamente 0,6.

No gráfico 19 pode-se observar os valores de TR por frequência, na sala PA03.

GRÁFICO 19 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA03

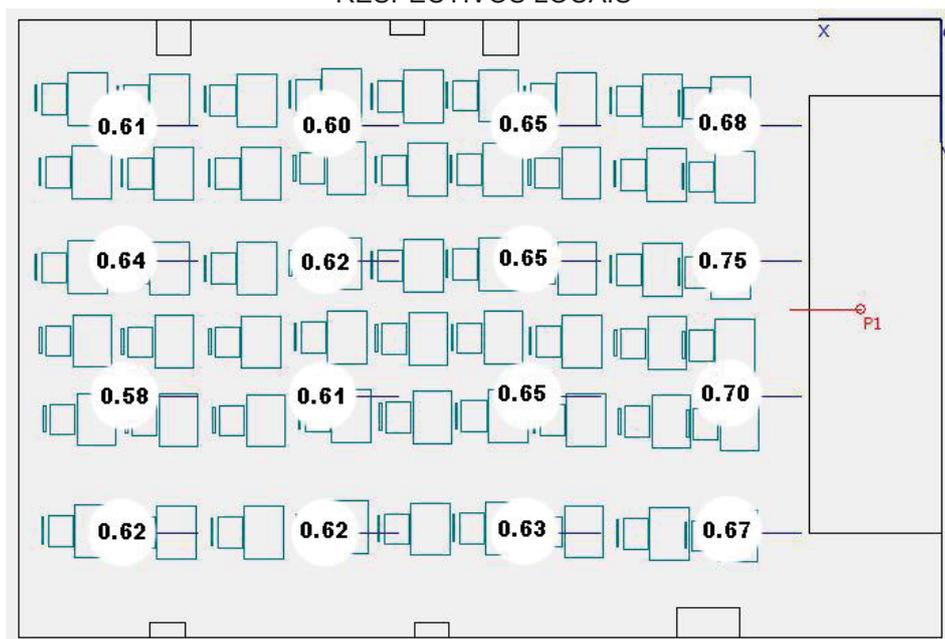


FONTE: O autor (2018)

5.2.3 Sala PA05

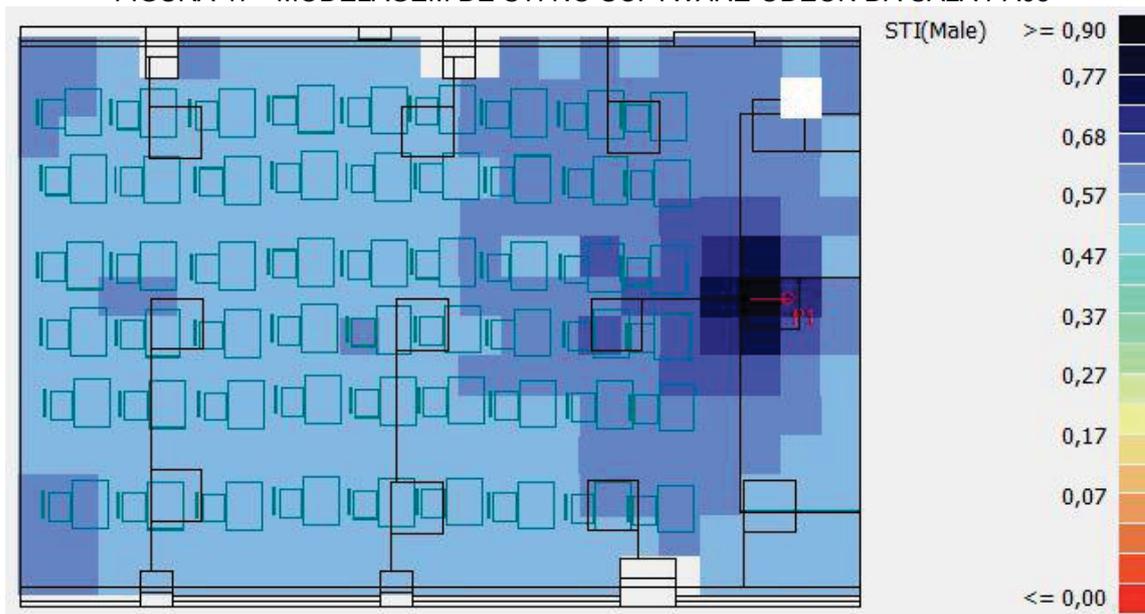
O valor médio do STI medido na sala PA05 é de 0,65 o que a classifica como boa segundo a ISO 9921:2003.

FIGURA 46 - CROQUI DA SALA PA 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



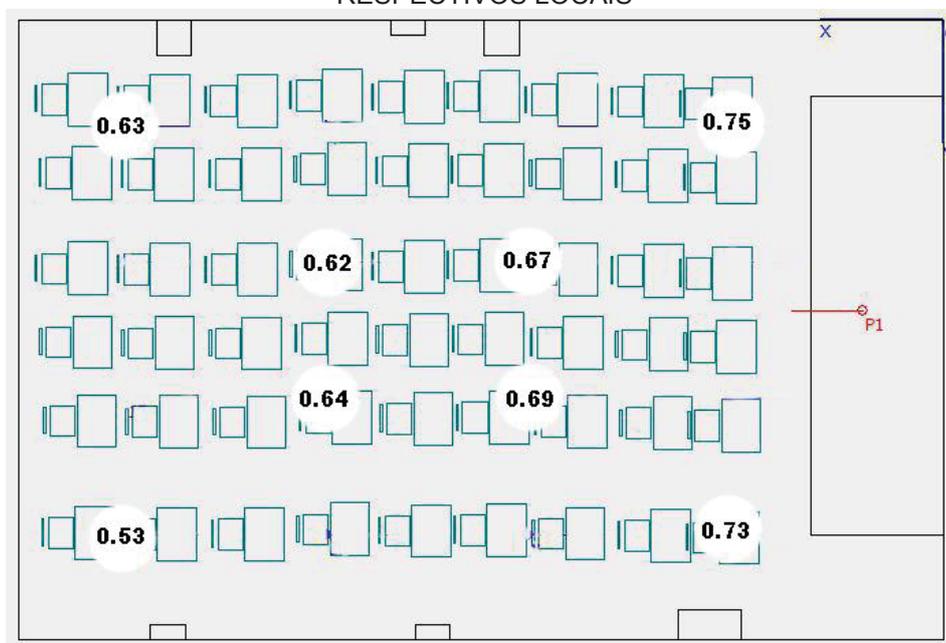
FONTE: O autor (2018)

FIGURA 47 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PA05



FONTE: O autor (2018)

Na simulação em ODEON da sala, observa-se a influência das largas colunas, no STI, na parte detrás da sala, tal qual na sala PA01, conforme a Figura 48, onde o STI médio foi de 0,65.

FIGURA 48 - CROQUI DA SALA PA 05 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS

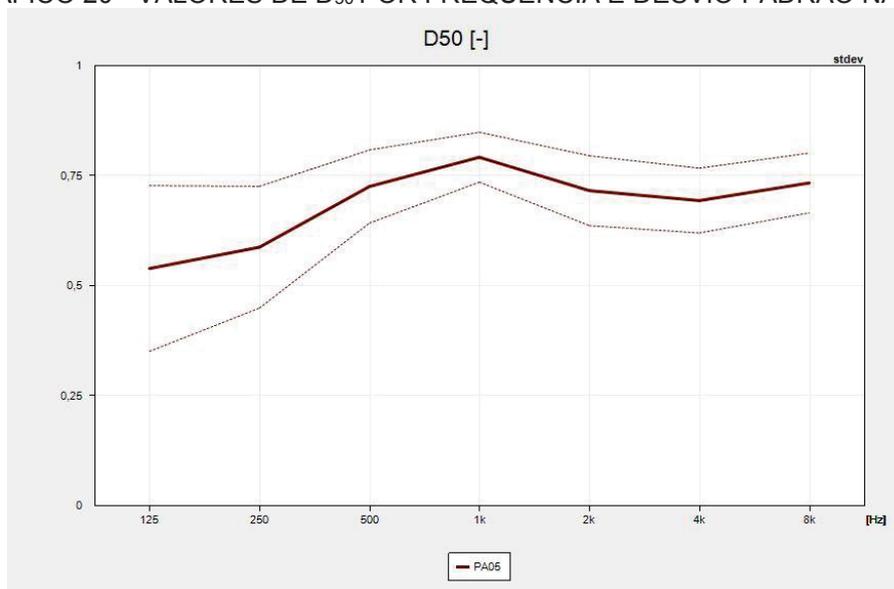
FONTE: O autor (2018)

Observa-se na Figura 49 que o valor de D_{50} médio medido na sala é de 0,66 atendendo Fasold e Veres (2003) e classificando com uma inteligibilidade boa de acordo com o calculado por Ansay e Zannin (2016).

O T_R médio da PA05 nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz é de 0,7 segundos não atendendo a especificação da ANSI/ASA para o volume da sala que é menor de 283 m³. Também não atende a NBR 12179 como sala de conferência, pois tem 0,74 s em 500 Hz onde deveria ter aproximadamente. 0,6.

O Gráfico 20 a seguir apresenta os valores de D_{50} por frequência e o desvio padrão, na sala de aula PA05.

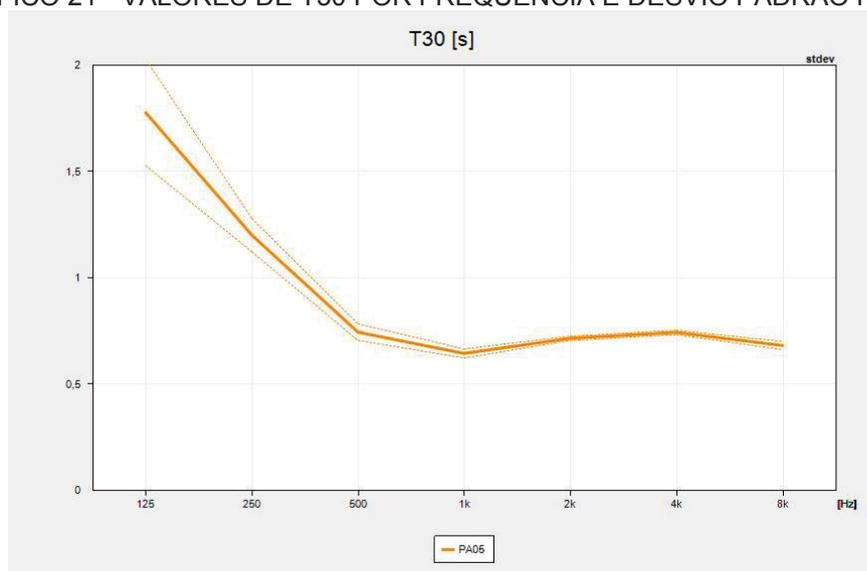
GRÁFICO 20 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA 05



FONTE: O autor (2018)

O Gráfico 21 apresenta os valores de T_R por frequência e o desvio padrão, na sala de aula PA05.

GRÁFICO 21 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA05



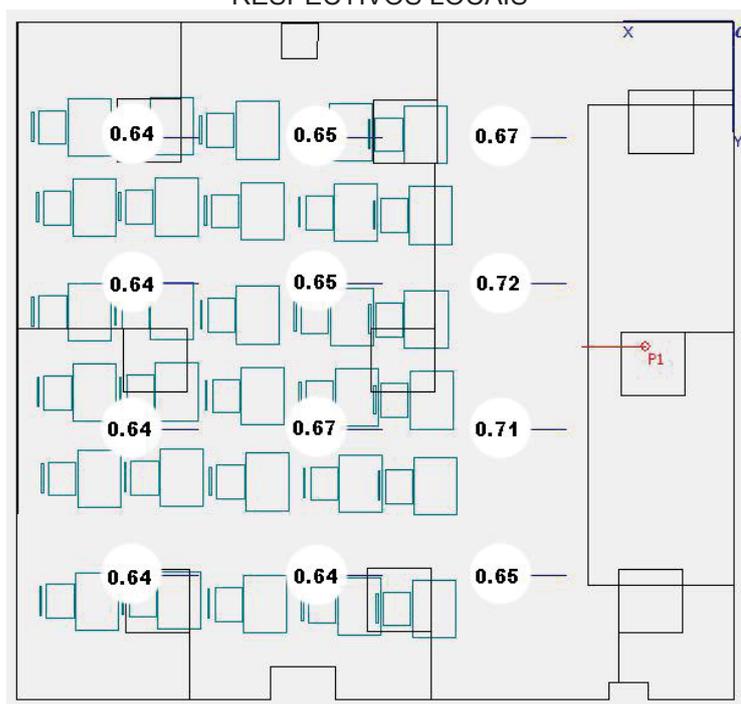
FONTE: O autor (2018)

5.2.4 Sala PA06

O valor médio do STI aferido na sala PA06 é de 0,66 o que a classifica como boa segundo a ISO 9921:2003.

A figura 50 mostra os valores de STI para a sala PA06.

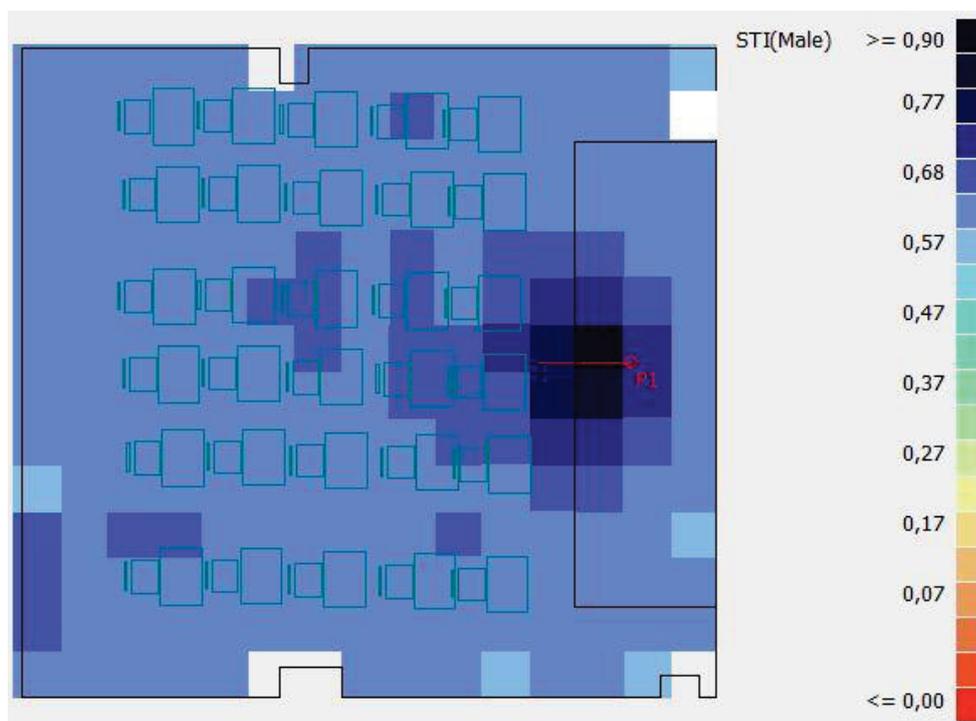
FIGURA 49 - CROQUI DA SALA PA06 COM OS VALORES MEDIDOS DE STI EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018)

Na simulação em ODEON da sala PA06, podemos observar uma excelente dissipação do som, graças ao tamanho pequeno da sala. O STI médio no projeto virtual em ODEON ficou em 0,68.

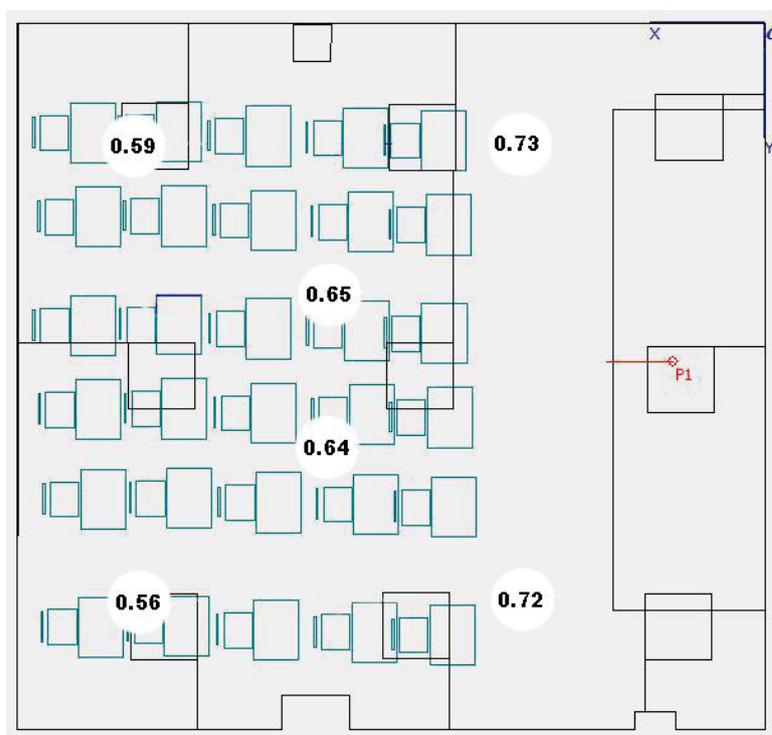
FIGURA 50 - MODELAGEM DE STI NO SOFTWARE ODEON DA SALA PA06



FONTE: O autor (2018)

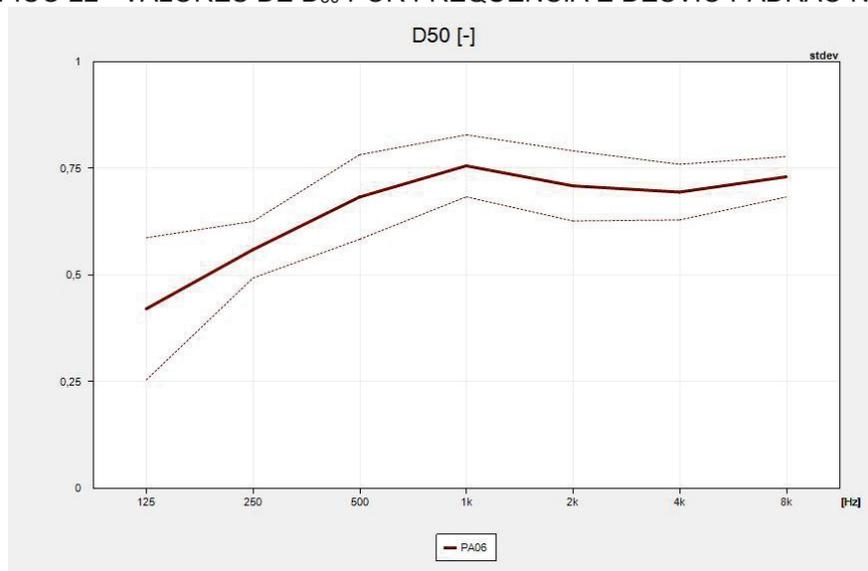
O valor de D_{50} médio medido na sala é de 0,65 atendendo Fasold e Veres (2003) e classificando com uma inteligibilidade boa de acordo com o calculado por Ansay e Zannin (2016).

FIGURA 51 - CROQUI DA SALA PA 06 COM OS VALORES MEDIDOS DE D_{50} EM SEUS RESPECTIVOS LOCAIS



FONTE: O autor (2018).

GRÁFICO 22 - VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA 06

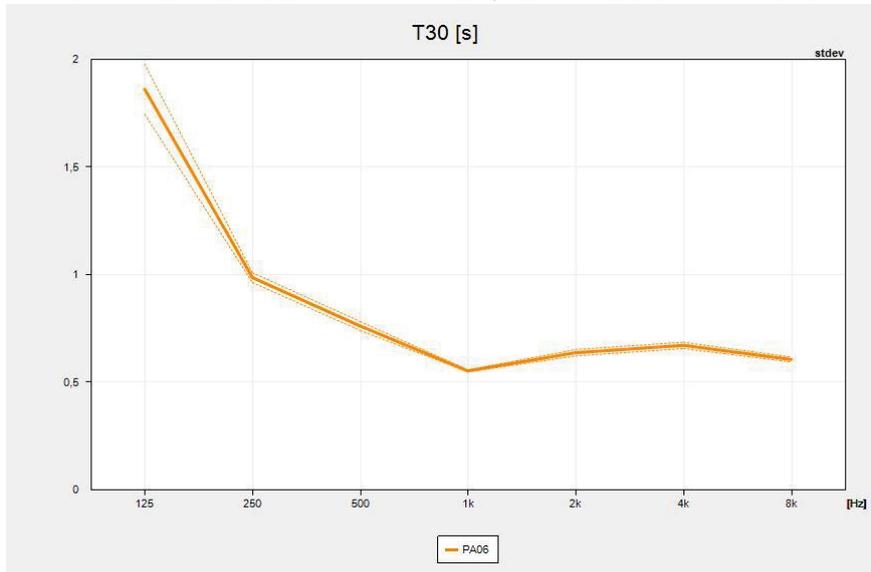


FONTE: O autor (2018)

O T_R médio da PA06 nas frequências de 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz é de 0,65 segundos não atendendo a especificação da ANSI/ASA. Porém não atende a NBR

12179 como sala de conferência, pois tem 0,76 s em 500 Hz onde deveria ter aproximadamente 0,6.

GRÁFICO 23 - VALORES DE T30 POR FREQUÊNCIA E DESVIO PADRÃO NA SALA PA06



FONTE: O autor (2018)

6 DISCUSSÃO

A Tabela 5 apresenta os valores médios de STI medidos, valores médios de STI simulados, os respectivos desvios padrão e o erro relativo entre os valores medidos e simulados. Foram utilizadas as equações apresentadas no Anexo A.

TABELA 5 - VALORES MEDIOS DE STI SIMULADO E MEDIDO E ERRO RELATIVO

PRÉDIO	SALA	STI MÉDIO MEDIDO	DESVIO PADRÃO (M)	STI MÉDIO SIMULADO	DESVIO PADRÃO (S)	ERRO RELATIVO
DÉCADA 60	PG03	0,58	3%	0,56	2%	4%
	PG04	0,55	4%	0,53	3%	3%
	PG05	0,74	5%	0,72	4%	4%
	PG06	0,46	2%	0,48	2%	4%
	PG07	0,43	6%	0,44	5%	2%
	PG15	0,48	2%	0,47	1%	1%
EXATAS	PA01	0,66	4%	0,65	4%	3%
	PA03	0,65	5%	0,68	3%	4%
	PA05	0,64	4%	0,65	3%	1%
	PA06	0,66	3%	0,68	2%	4%
	MÉDIA	0,54	4%	0,53	3%	3%

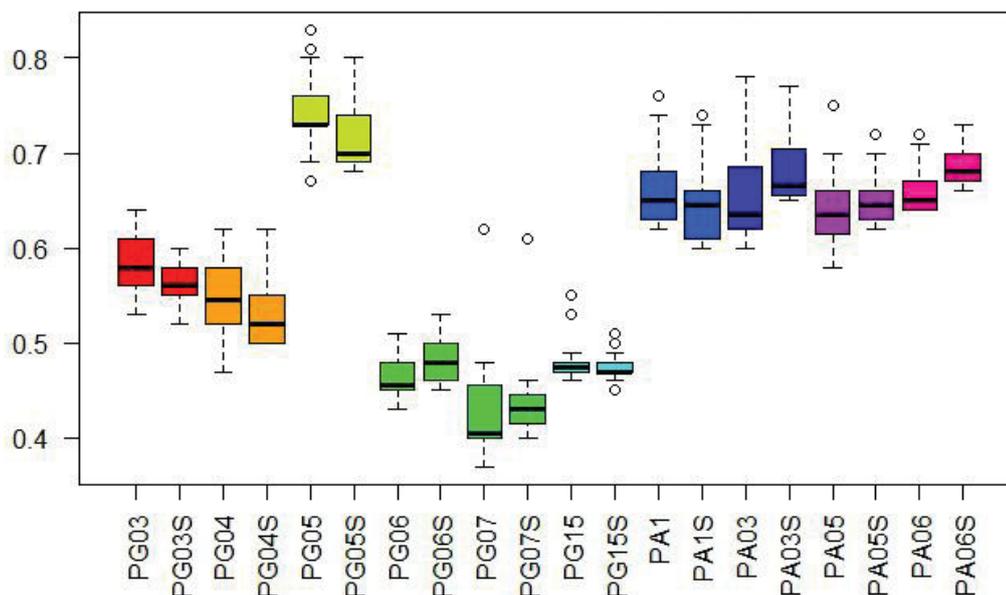
FONTE: O autor (2018)

Conforme observado nos valores médios medidos de STI, a sala PG05 é a que tem melhor inteligibilidade de fala e, conseqüentemente, é o melhor dos ambientes analisados para uma boa aprendizagem. Não por acaso, é a única sala do Bloco IV, denominadas Salas PG, do prédio da década de 60 que manteve o teto acústico original. Representa a acústica que as salas do prédio da década de 60 deveriam ter antes das alterações do teto acústico original por um forro de PVC.

Bistafa e Bredlay (2000), bem como Hodgson (1996), classificaram que um erro relativo para valores de T_R a nível de engenharia seria de até 10%. De acordo com a Tabela 5, os erros relativos que foram obtidos nas medições e nas simulações de STI estão abaixo deste valor, demonstrando assertividade nas medições.

O Gráfico 24 mostra os valores medidos de STI nas salas de aula, assim como os valores de STI das simulações – para clareza, com terminação em ‘S’.

GRÁFICO 24 – STI MÉDIO MEDIDO E STI MÉDIO SIMULADO DAS SALAS



FONTE: O autor (2018)

Ao se analisar as salas do prédio antigo no Gráfico 24, é visto que as salas PG03 e PG04 tem um desempenho de STI ligeiramente melhor que a PG06, PG07 e PG15. Esta diferença é atribuída a um defeito na alavanca de fechamento das janelas, uma vez que algumas janelas não puderam ser fechadas, havendo assim um acréscimo de STI conforme o estudo de Tang e Yeung (2006).

De acordo com a classificação da ISO 9921:2003, as salas de aula avaliadas no prédio antigo são 'razoáveis'; com exceção à PG 05. Pelo mesmo parâmetro, as salas do prédio novo e PG 05 são classificadas como 'boas'.

Em referência a norma inglesa BB93 de fevereiro de 2015, que estabelece padrões de desempenho de design acústico em escolas, as salas estudadas do prédio da década de 60 não estão aprovadas, mais uma vez com exceção à PG05. O valor mínimo de STI referenciado nesta norma para a instrução ou atividade de escuta crítica dentro de grupo é de 0,60.

A norma adotada para a medição, IEC 60268-16:2011, sugere em seu Anexo G que o valor de STI para salas de aula deve ser acima de 0,62. Essa referência, evidencia ainda mais a falta de qualidade das salas PG03, PG04, PG06, PG07 e PG15, todas da construção antiga. Em contrapartida, as salas do prédio mais recente

e a PG05 estão dentro da sugestão da norma para aplicação específica em salas de aula.

Do ponto de vista da norma finlandesa SFS 5907 (2004), nenhuma das salas analisadas é apropriada, dado que a exigência é de STI maior ou igual a 0,80 para salas de aula.

A Tabela 6 compara as normas apresentadas com as salas de aulas medidas.

TABELA 6 -COMPARAÇÃO DE VALORES STI QUANTITATIVO E QUALITATIVO

PRÉDIO	SALA	QUANTITATIVO	ISO 9921:2003	ANEXO G - IEC 60268-16:2011	SFS 5907:2004
DÉCADA 60	PG03	0,58	Razoável	Não conforme	Não apropriada
	PG04	0,55	Razoável	Não conforme	Não apropriada
	PG05	0,74	Bom	Conforme	Não apropriada
	PG06	0,46	Razoável	Não conforme	Não apropriada
	PG07	0,43	Pobre	Não conforme	Não apropriada
	PG15	0,48	Razoável	Não conforme	Não apropriada
EXATAS	PA01	0,66	Bom	Conforme	Não apropriada
	PA03	0,65	Bom	Conforme	Não apropriada
	PA05	0,64	Bom	Conforme	Não apropriada
	PA06	0,66	Bom	Conforme	Não apropriada

FONTE: O autor (2018)

A pesquisa de Milulski e Radosz (2011), em 110 salas na Polônia, encontrou uma grande diversidade de propriedades acústicas entre as salas de aula. Esta diversidade foi relacionada a diferenças construtivas e dos materiais empregados nas salas, da mesma maneira que foi encontrado na UFPR.

Na Finlândia, 16 das 40 salas estudadas por Sala e Rantala, em 2016, o STI estava abaixo de 0,75, enquanto no presente estudo 9 das 10 salas analisadas obtiveram esse valor. Em relação aos valores de T_R na faixa de 250 Hz a 4000 Hz, na Finlândia 30 das 40 salas ficaram com valores abaixo de 0,6 segundos contra 1 das 10 analisadas na UFPR; onde apenas a PG05 tem T_R menor, sendo de 0,5 segundos.

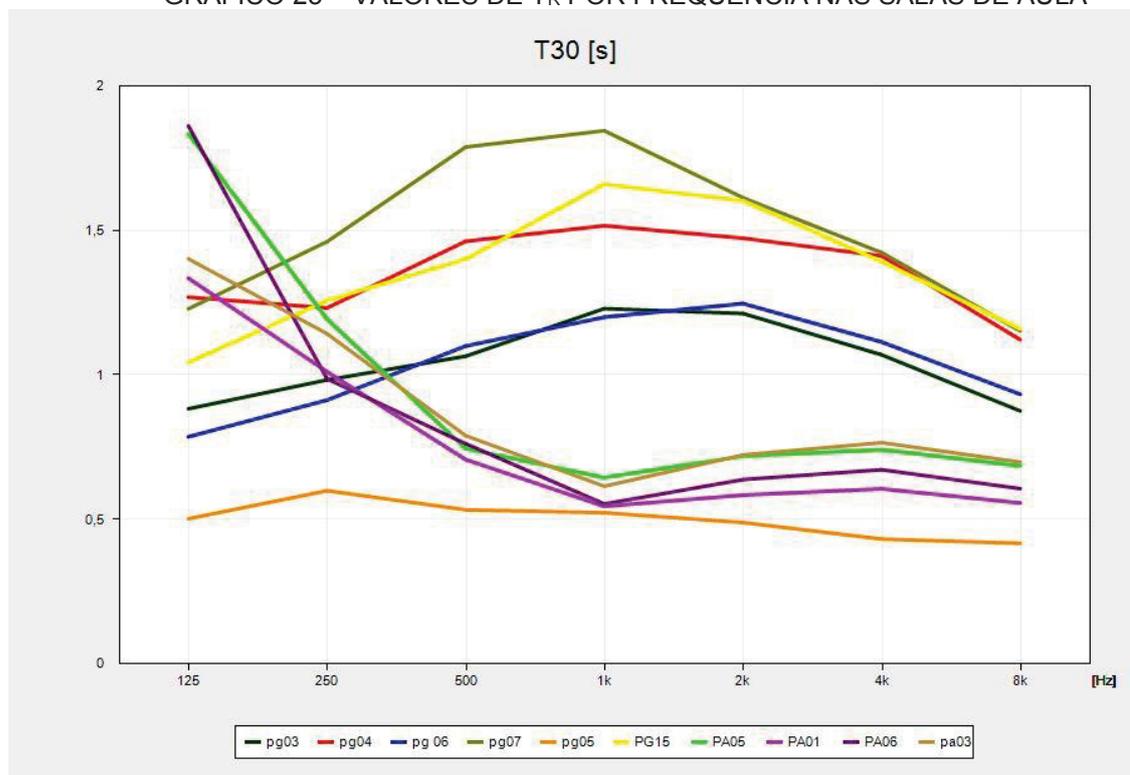
Ao compararmos os valores obtidos nas medições com as escalas qualitativas de D_{50} de Fasold (2003) e Ansay e Zannin (2016), compilou-se a Tabela 7. Vale lembrar que a escala de Ansay e Zannin foi calculada a partir de Marshal (1994). Conclui-se que os valores qualitativos estipulados por Marshal exigem uma performance mais alta da qualidade acústica das salas.

TABELA 7 – COMPARATIVO ENTRE VALORES QUALITATIVOS DE D_{50}

PRÉDIO	SALA	VALOR QUANTITATIVO	QUALITATIVO Fasold (2003)	QUALITATIVO Ansay e Zannin (2016)
DÉCADA 60	PG03	0,5	Não atende	Razoável
	PG04	0,41	Não atende	Razoável
	PG05	0,82	Atende	Bom
	PG06	0,48	Não atende	Razoável
	PG07	0,41	Não atende	Razoável
	PG15	0,44	Não atende	Razoável
EXATAS	PA01	0,71	Atende	Bom
	PA03	0,66	Atende	Razoável
	PA05	0,66	Atende	Razoável
	PA06	0,65	Atende	Razoável

FONTE: O autor (2018)

Analisando os tempos de reverberação foi produzido no DIRAC o Gráfico 25 com os valores de T_R por frequência, contemplando todas as salas onde foram feitas medições.

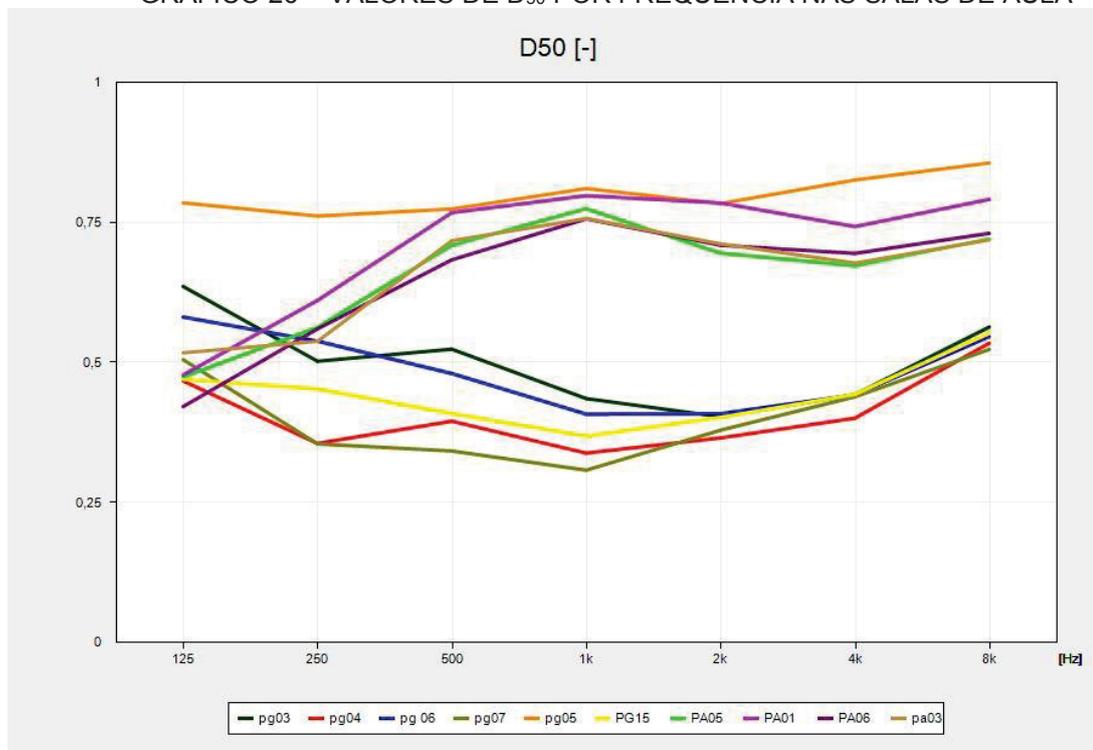
GRÁFICO 25 – VALORES DE T_R POR FREQUÊNCIA NAS SALAS DE AULA

FONTE: O autor (2018)

Ao se analisar o Gráfico 25 fica nítido o aumento de reverberação nas médias e altas frequências das salas PG03, PG04, PG06, PG07 E PG15. Isto ocorre devido

ao forro de PVC instalado nesses locais. Este contraste pode ser visto também no Gráfico 26 onde há uma queda nos valores de D_{50} nas faixas de média a alta frequência nas mesmas salas.

GRÁFICO 26 – VALORES DE D_{50} POR FREQUÊNCIA NAS SALAS DE AULA



FONTE: O autor (2018)

O forro acústico empregado nas salas, do prédio da década de 60, possui absorção maior nas faixas de frequência de 500 a 4000 Hz sustentando a afirmação que a troca do forro foi a causa maior da perda da qualidade acústica das salas.

Tanto no Gráfico 25 quanto no Gráfico 26, observa-se que a sala PG05 possui um desempenho melhor do que as outras salas. Um dos motivos para isso é a menor reverberação em baixas frequências; lembrando que as baixas frequências podem ser provenientes de ruídos elétricos ou eletrônicos.

Fazendo um comparativo entre as medidas de STI, D_{50} e T_R , com seus valores correspondentes em suas escalas qualitativas, considerando que o valor de STI razoável não atende padrão de acústica para sala de aula, observa-se que há uma congruência bastante grande no que diz respeito as classificações qualitativas da ISO 9921:2003, com Fasold e Veres (2003) e com a ANSI conforme a Tabela 8.

Somente os valores de T_R nas salas PA03 e PA05 ficaram com resultados qualitativos diferentes, porém muito próximos de atender a ANSI/ASA.

TABELA 8 - VALORES MEDIDOS (QUANTITATIVOS) E RELAÇÃO COM VALORES QUALITATIVOS DE STI, D₅₀ E T_R

SALA	STI		D ₅₀		T _R 500, 1000 e 2000 Hz	
	QUANTITATIVO	QUALITATIVO ISO 9921:2003	QUANTITATIVO	QUALITATIVO Fasold (2003)	VALOR (s)	ANSI
PG03	0,58	razoável	0,5	não atende	1,15	não atende
PG04	0,55	razoável	0,41	não atende	1,49	não atende
PG05	0,74	bom	0,82	atende	0,51	sim atende
PG06	0,46	razoável	0,48	não atende	1,19	não atende
PG07	0,43	pobre	0,41	não atende	1,73	não atende
PG15	0,48	razoável	0,44	não atende	1,55	não atende
PA01	0,66	bom	0,71	atende	0,6	sim atende
PA03	0,65	bom	0,66	atende	0,7	não atende
PA05	0,64	bom	0,66	atende	0,7	não atende
PA06	0,66	bom	0,65	atende	0,65	sim atende

FONTE: O autor (2018)

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ainda que estudos recentes apontem a necessidade da qualidade acústica nos ambientes de aprendizagem, o presente estudo apresenta resultados que sugerem que a acústica das salas de aula analisadas é negligenciada e subestimada pelo Departamento de Manutenção da UFPR.

A troca do teto acústico por um forro de PVC nas salas mais antigas do Centro Politécnico prejudicou a transmissão de fala nas salas de aula, sendo confirmado através dos resultados obtidos nas simulações realizadas. Portanto, é recomendado que a UFPR retome o revestimento para reestabelecer a qualidade acústica das salas.

Durante a manutenção das salas de aula, além da busca por materiais mais absorventes de som, deve-se procurar reduzir o volume das salas, seja por meio de rebaixamento de tetos – facilitando a instalação de tetos acústicos – seja por meio de elevação do piso, como os tablados.

É proposto que qualquer alteração na estrutura e no material das salas de aula seja feita consultando-se o LAAICA para evitar gastos com investimentos que venham a piorar a qualidade acústica das salas de aula e por consequência o nível de aprendizado na UFPR.

Seria conveniente dar continuidade ao projeto, aumentando o número de salas e, principalmente, realizando medições em um número maior de prédios. Novos *layouts* construtivos e novos materiais têm sido empregados, abrangendo assim a área de estudo.

Por fim, em boa parte da literatura consultada não há descrição da metodologia de forma nítida e verificou-se o uso de equipamentos não recomendados. Ressalta-se que as medições de STI e T_R devem ser feitas com caixa acústica direcional (como o simulador de boca) e caixa omnidirecional (como a caixa dodecaédrica), respectivamente em concordância com as normas ISO 3328-1 (2009), IEC 60268-16:2011 e a BB93.

Uma sugestão para trabalhos futuros é discorrer sobre um agrupamento de palavras em português com a finalidade de medir a inteligibilidade de fala e comparar os resultados com STI. Por conseguinte, se relacionaria a análise com atual trabalho, que utiliza como parâmetro a língua inglesa.

Por último sugere-se a elaboração de uma NBR que estabeleça e especifique parâmetros mínimos de construção para sala de aulas, considerando o processo de aprendizagem como propósito principal.

REFERÊNCIAS

AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. **ANSI/ASA s12.60-2010/PART 1: Acoustical Performance criteria, Design Requirements, and guidelines for Schools, Part 1: Permanent Schools.** Acoustic Society of America, 2010.

ALI, S. A. A.; Study effects of school noise on learning achievement and annoyance in Assiut city, Egypt. **Applied Acoustics** 74 (2013) 602–606.

ALVES, L.R.; BRASILEIRO, T.C.; ARAUJO, R.O.; ALVES, J.S.; ARAÚJO, V.M.D.; ARAÚJO, B.C.D.; Analise do condicionamento acústico de salas de aula a partir de métodos experimental, numérico e simulação. Anais do encontro da sociedade Brasileira de Acústica. (2017), (p. 535 a 544).

ANSAY, S.; ZANNIN, P. H. T.; Using the parameters of Definition, D_{50} , And Reverberation Time, RT, to investigate the acoustic quality of classrooms. *Canadian Acoustics / Acoustique Canadienne* Vol. 44 No. 4 (2016) – 1.

ARAU-P. H., An improved reverberation formula, *Acustica*, 65, 163–180. (1988)

ASTOLFI, A.; BOTTALICO, P.; BARBATO, G.; Subjective and objective speech intelligibility investigations in primary school classrooms - **The Journal of the Acoustical Society of America** 131, 247 (2012)

AUGUSTYNSKA, D.; KACZAMARSKA, A.; MIKULSKI, W.; RADOSZ, J. Assessment of Teacher's Exposure to Noise in Selected Primary Schools. **Archives of Acoustics**. p. 521-542, 2010.

BARBETTA, P.A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C.; Estatística para cursos de engenharia e informática. **Editora atlas**, 2010

BERANEK, L. L. *Noise Reduction*. 1 ed. New York: **McGraw-Hill**, 1960.

BISTAFA, S. R.; Bradley J.S.; - Predicting speech metrics in a simulated classroom with varied sound absorption. **The Journal of the Acoustical Society of America** 108, 1721 (2000);

BISTAFA, S.R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. 2ed. São Paulo: Blucher, 2011.

BRÜEL & KJAER. *DIRAC: Room Acoustics Software Type 7841 – Version 3.0 – Instruction Manual*. Dinamarca: 2003, 110 p.

CAVANAUGH, W. J.; TOCCI, G. C.; WILKES, J. A.; HARRIS, C. M. **Architectural Acoustics: Principles and Practice**. 2 ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BORRACHA. Disponível em: <https://ctborracha.com/?page_id=1667>. Acesso em: 28 ago. 2017.

EVEREST, F. A. **Master Handbook of Acoustic**. 4 ed. New York: McGraw-Hill, 2001.

ESCOBAR, V. G.; MORILLAS, J.M.B.; Analysis of intelligibility and reverberation time recommendations in educational rooms - **Applied Acoustics** 96 (2015) 1–10.

Encontro da SOBRAC, II Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações – SIBRAMA, Rio de Janeiro, 2002.

FASOLD, W.; VERES, E. Schallschutz und Raumakustic in der práxis. Plansungsbeispiele und konstruktive lösungen. Muss-medien GmbH, Berlin, 2003.

FILHO, M. V. M. de; **O Ruído Ambiental**: avaliação acústica de edificações. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental – Universidade Federal do Paraná, 2014.

Finnish Standards Association SFS. **SFS 5907: en ACOUSTIC CLASSIFICATION OF SPACES IN BUILDINGS**. SUOMEN STANDARDISOIMISLIITTO. 2006.

FERNANDES A.G.; VIVEIROS, E B. Impacto do ruído de tráfego em edificações escolares: uma metodologia de avaliação para o planejamento urbano. In: XX

FERREIRA, A.M.C. **Avaliação do Conforto Acústico em salas de Aula**: Estudo de Caso na Universidade Federal do Paraná. 128f. Tese (Doutorado em eng. Mecânica) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba 2006.

FRENCH, N R; STEINBERG, J C. Factor Governing the Intelligibility of Speech Sound. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 19, n. 1, p. 90-119, 1947.

HAGEN, M.; HUBER, L.; KAHLERT, J. Acoustic school easing. In: **Proc. Of the Int. Forum Acusticum Sevilha**, Sevilha, 2002.

HARRIS, C. M. **Handbook of acoustical measurements and noise control**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 1998.

HODGSON, M.; When is Diffuse-Field Theory Applicable? - **Applied Acoustics**, Vol. 49, No. 3, pp.191-201, 1996

HONGISTO, V.; KERANEN, J.; LARM, P. Simple model for acoustical design of open-plan offices. **Acta Acustica**, Stuttgart, v. 90, p. 481, 2004.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M.; A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 77, n. 3, pp. 1069-1077, 1985.

HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M.; The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Prediction of Speech Intelligibility, **Journal of the Acoustical Society of America**, Melville, NY, v. 54, n. 2, p. 557, 1973.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60268-16**: Sound system equipment – Part 16: Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index. Switzerland, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-1:2009**: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces. Switzerland, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382-2:2008**: Acoustics – Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Switzerland, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9921:2003**: Ergonomics – Assessment of speech communication. Switzerland, 2003.

KARABIBER, K.; VALLET, M. **Classroom acoustics policies**: an overview. In: Euro noise Naples, Italy, 2003.

KNAUF AMG. Ficha técnica 04/2016. Disponível em: <http://knauf.com.br/sites/default/files/Ficha%20T%C3%A9cnica%20-%20Knauf%20AMF_0.pdf> Acesso: 5 nov 2017.

KNUDSEN, O.; HARRIS, C. M. **Acoustical designing in architecture** Published by the American Institute of Physics for the Acoustical Society of America, 1978 - 408 p.

LAZARUS H.; SUST, C.A.; STECKEL, R.; KULKA, M.; KURTZ, P.; **Akustische Grundlagen sprachlicher kommunikation**. Auflage 1. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2007. 277 p.

LONG, M. **Architectural Acoustic**. San Diego: Elsevier, 2006.

LONGONI, H. C.; FERREYRA, S. P.; CRAVERO, G. A.; LÓPEZ, F.; PARADA, M. F.; DÍAZ, M. S.; BUDDE, L.; RAMOS, O. S.; MORENO, A. M.; GILBERTO, L. G.; **Speech Transmission Index Variation Due to Ventilation and Air-conditioning System in University Classrooms**. ICA – 22º International Congresso f Acoustics. Buenos Aires – 5 a 9 de setembro, 2016

LOSSO, M. A. F. **Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina**: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação. Dissertação de Mestrado em Construção Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

LUBMAN, M. A. F.; SUTHERLAND, L. C. Good classroom acoustics in a good investment. **Classroom Acoustics**, p. 1-2, 2003.

MARSHALL, L. G.; An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. The Journal of the Acoustical Society of America 96, 2251 (1994).

MODESTO, A.; SILVA JUNIOR, O.J.; REGO SILVA, J.J.; Inteligibilidade da fala em salas de aula. Anais do encontro da sociedade Brasileira de Acústica. (2017), (p. 740 a 746).

MIKULSKI, W.; RADOSZ, W. J. Acoustics of Classrooms in Primary Schools – Results of the Reverberation Time and the Speech Transmission Index Assessments in Selected Buildings **ARCHIVES OF ACOUSTICS** 36, 4, 777–793 (2011).

MULLER, S.; Medir o STI. II Seminário de Música, Ciência e Tecnologia, São Paulo, 2005. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0_000000102005000100001&lng=en&nrm=iso> Acesso em: junho, 2017.

NESTORAS, C.; DANCE, S.; The Interrelationship Between Room Acoustics Parameters as Measured in University Classrooms Using Four Source Configurations - **BUILDING ACOUSTICS** · Volume 20 · Number 1 · 2013 Pages 43–54.

PASSERO C.; ZANNIN P.H.T. Statistical comparison of reverberation times measured by the integrated impulse response and interrupted noise methods, computationally simulated with ODEON software, and calculated by Sabine, Eyring and Arau-Puchades formulas. **Applied Acoustics**, v. 71, p. 1204-1210, 2010.

RABELO, A. T. V.; SANTOS, J. N.; OLIVEIRA, R.C.; MAGALHÃES, M. C. Effect of Classroom Acoustics on the Speech Intelligibility of Students. 2014. Disponível em: <www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2317-17822014000500360>. Acesso em: 30/12/2016.

REICH, R.; BRADLEY, J.; Optimizing Classroom Acoustics Using Computer Model Studies - *Canadian Acoustics* 26(4) 15-21 (1998).

REYNOLDS, D D. Engineering Principles of Acoustic – noise and vibration controls. Boston, 1985.

Sommerhoff, J.; Rosas, C.; The evaluation of the intelligibility of speech in Spanish - *ESTUDIOS FILOLOGICOS* 42: 215-225, 2007

SALA, E.; RANTALA, L.; Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland. **Applied Acoustics** 114 (2016) 252–259.

SECCHI, S.; ASTOLFI, A.; CALOSSO, G.; CASINI D.; CELLAI G; SCAMONI F.; SCROSATI C.; SHTREPI, L.; Effect of outdoor noise and façade sound insulation on indoor acoustic environment of Italian schools - **Applied Acoustics** 126 (2017) 120–130

SALA, E.; RANTALA, L. Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland. **Applied Acoustics**, v. 114, p. 252-259, dez 2016.

SILVA, E. L. Laboratório de Conforto Ambiental e Sustentabilidade dos Edifícios/CETAC. Curitiba, 24 set. 2009. Informação por e-mail <ellemos@ipt.br>

SILVA, P. **Acústica Arquitetônica & Condicionamento de Ar.** 3ª edição. Belo Horizonte: Editora Termo Acústica LTDA, 1997. 277 p.

TANG, S. K.; YEUNG, M. H. Reverberation Times and Speech Transmission Indices in Classrooms. **Journal of Sound and Vibration.** v. 294, junho de 2006. p 596-607.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO (UFRRJ).
Acidentes/doenças/professor/acustica. **A Saúde do Professor** em:
<<http://www.ufrrj.br/institutos/it/de/acidentes/voz5.htm> >. Acesso: 5 maio 2018.

VALLET, S. **Manual Prático de Acústica.** 3 ed. Rio de Janeiro: Editora Música & Tecnologia, 2009.

ZANNIN, P. H. T.; FERREIRA A. C.; SANT'ANA, D. Q.; Comparação do tempo de reverberação e índice de transmissão de fala (STI) em salas de aula construídas em décadas diferentes. **Ambiente construído**, Porto Alegre v. 9, n. 3, p. 125-139, 2009.

ZANNIN, P. H. T.; PASSERO, C. R. M.; FIEDLER, P. E. K.; Avaliação do tempo de reverberação e índice de transmissão de fala em sala de aula da Universidade Federal do Paraná. In: Evento de Iniciação Científica da UFPR - EVINCI, Curitiba, Paraná, Brasil, 2010.

ZHU, P.; MO, F.; KANG, J.; ZHU, G.; Comparisons between simulated and in-situ measured speech intelligibility based on (binaural) room impulse responses - **Applied Acoustics** 97 (2015) 65–77

ANEXO A – CALCULO DE DESVIO PADRAO E ERRO RELATIVO.

Os programas DIRAC e ODEON calculam automaticamente tanto o desvio padrão bem como o erro relativo, porem buscamos na literatura formas de calcular e conferir os valores, que foram totalmente iguais aos dos programas. Seguem as equações:

O desvio padrão usado a partir de Barbeta, Reis e Bornia (2010) é uma medida do grau de dispersão dos valores em relação ao valor médio, foi calculado em Excel a partir da equação abaixo:

$$Desvio\ padrao = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

Onde:

\bar{x} : média aritmética de todos os valores;

x: valor no ponto de medição;

n: número de pontos de medição.

Já o erro relativo é o valor absoluto da razão entre a diferença do valor medido e simulado pelo valor simulado:

$$Erro = \left| \frac{Valor\ Medido - Valor\ simulado}{valor\ medido} \right|$$

**APÊNDICE A – TABELAS CONTENDO OS VALORES DE MEDIÇÃO, DE
SIMULAÇÃO E RESPECTIVOS DESVIOS PADRÃO E ERRO RELATIVO DAS
SALAS**

PG 03			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P02	0,62	0,60	3,2%
P03	0,64	0,59	7,8%
P04	0,61	0,58	4,9%
P05	0,62	0,59	4,8%
P06	0,61	0,52	14,8%
P07	0,59	0,54	8,5%
P08	0,56	0,55	1,8%
P09	0,58	0,55	5,2%
P10	0,58	0,54	6,9%
P11	0,57	0,56	1,8%
P12	0,56	0,55	1,8%
P13	0,57	0,58	1,8%
P14	0,54	0,57	5,6%
P15	0,53	0,56	5,7%
Média	0,58	0,56	3,7%
DESVIO	3%	2%	

PG 04			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,62	0,55	11,3%
P02	0,58	0,62	6,9%
P03	0,54	0,58	7,4%
P04	0,60	0,53	11,7%
P05	0,57	0,55	3,5%
P06	0,58	0,55	5,2%
P07	0,61	0,56	8,2%
P08	0,58	0,55	5,2%
P09	0,56	0,52	7,1%
P10	0,55	0,52	5,5%
P11	0,56	0,52	7,1%
P12	0,52	0,51	1,9%
P13	0,52	0,50	3,8%
P14	0,52	0,50	3,8%
P15	0,54	0,50	7,4%
P16	0,51	0,50	2,0%
P17	0,47	0,52	10,6%

P18	0,51	0,50	2,0%
P19	0,52	0,50	3,8%
P20	0,50	0,52	4,0%
MÉDIA	0,55	0,53	3%
DESVIO	4%	3%	

PG 05			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,83	0,8	3,6%
P02	0,81	0,79	2,5%
P03	0,8	0,75	6,3%
P04	0,73	0,7	4,1%
P05	0,76	0,71	6,6%
P06	0,75	0,74	1,3%
P07	0,67	0,7	4,5%
P08	0,69	0,69	0,0%
P09	0,73	0,68	6,8%
P10	0,73	0,69	5,5%
P11	0,7	0,7	0,0%
P12	0,74	0,69	6,8%
P13	0,73	0,69	5,5%
P14	0,73	0,70	4,1%
Média	0,74	0,72	4%
DESVIO	5%	4%	

PG 06			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,51	0,53	3,9%
P02	0,5	0,52	4,0%
P03	0,49	0,5	2,0%
P04	0,48	0,5	4,2%
P05	0,47	0,45	4,3%
P06	0,46	0,46	0,0%
P07	0,45	0,46	2,2%
P08	0,45	0,46	2,2%
P09	0,45	0,47	4,4%
P10	0,47	0,47	0,0%
P11	0,45	0,49	8,9%
P12	0,44	0,48	9,1%
P13	0,43	0,48	11,6%
P14	0,44	0,48	9,1%
Média	0,46	0,48	4%

DESVIO	2%	2%	
--------	----	----	--

PG 07			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,4	0,42	5,0%
P02	0,47	0,45	4,3%
P03	0,62	0,61	1,6%
P04	0,48	0,46	4,2%
P05	0,4	0,41	2,5%
P06	0,42	0,43	2,4%
P07	0,47	0,44	6,4%
P08	0,44	0,45	2,3%
P09	0,4	0,41	2,5%
P10	0,41	0,42	2,4%
P11	0,4	0,4	0,0%
P12	0,41	0,41	0,0%
P13	0,37	0,42	13,5%
P14	0,39	0,43	10,3%
P15	0,4	0,43	7,5%
P16	0,39	0,43	10,3%
Média	0,43	0,44	2%
DESVIO	6%	5%	

PG 15			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,48	0,47	2%
P02	0,55	0,50	9%
P03	0,53	0,51	4%
P04	0,48	0,49	2%
P05	0,47	0,45	4%
P06	0,49	0,47	4%
P07	0,48	0,46	4%
P08	0,46	0,45	2%
P09	0,46	0,46	0%
P10	0,48	0,47	2%
P11	0,48	0,47	2%
P12	0,47	0,47	0%
P13	0,47	0,47	0%
P14	0,49	0,47	4%
P15	0,47	0,48	2%
P16	0,46	0,47	2%
P17	0,47	0,47	0%

P18	0,47	0,47	0%
P19	0,48	0,48	0%
P20	0,46	0,48	4%
MÉDIA	0,48	0,47	1%
DESVIO	2%	1%	

PA 01			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,69	0,67	3%
P02	0,74	0,74	0%
P03	0,76	0,73	4%
P04	0,70	0,66	6%
P05	0,66	0,66	0%
P06	0,68	0,66	3%
P07	0,67	0,66	1%
P08	0,65	0,65	0%
P09	0,63	0,61	3%
P10	0,64	0,6	6%
P11	0,65	0,62	5%
P12	0,62	0,6	3%
P13	0,64	0,63	2%
P14	0,62	0,60	3%
P15	0,62	0,61	2%
P16	0,63	0,62	2%
Média	0,66	0,65	3%
DESVIO	4%	4%	

PA 03			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,69	0,71	2,9%
P02	0,78	0,77	1,3%
P03	0,74	0,75	1,4%
P04	0,69	0,69	0,0%
P05	0,69	0,71	3%
P06	0,68	0,7	3%
P07	0,67	0,68	1%
P08	0,67	0,71	6%
P09	0,63	0,66	5%
P10	0,66	0,65	2%
P11	0,61	0,66	8%
P12	0,64	0,65	2%
P13	0,6	0,65	8%

P14	0,63	0,66	5%
P15	0,62	0,65	5%
P16	0,62	0,66	6%
P17	0,61	0,67	10%
P18	0,62	0,66	6%
P19	0,63	0,65	3%
P20	0,6	0,67	12%
Média	0,65	0,68	4%
DESVIO	5%	3%	

PA 05			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,68	0,66	3%
P02	0,75	0,72	4%
P03	0,7	0,7	0%
P04	0,67	0,65	3%
P05	0,65	0,66	2%
P06	0,65	0,66	2%
P07	0,65	0,65	0%
P08	0,63	0,65	3%
P09	0,6	0,62	3%
P10	0,62	0,63	2%
P11	0,61	0,63	3%
P12	0,62	0,63	2%
P13	0,61	0,64	5%
P14	0,64	0,64	0%
P15	0,58	0,63	9%
P16	0,62	0,64	3%
Média	0,64	0,65	1%
DESVIO	4%	3%	

PA 06			
PONTO	STI MEDIDO	STI SIMULADO	ERRO RELATIVO
P01	0,67	0,67	0%
P02	0,72	0,73	1%
P03	0,71	0,71	0%
P04	0,65	0,67	3%
P05	0,65	0,68	5%
P06	0,65	0,71	9%
P07	0,67	0,68	1%
P08	0,64	0,68	6%
P09	0,64	0,66	3%

P10	0,64	0,69	8%
P11	0,64	0,66	3%
P12	0,64	0,67	5%
Média	0,66	0,68	4%
DESVIO	3%	2%	

APÊNDICE B – TABELAS CONTENDO OS VALORES DE MEDIÇÃO DE D₅₀ E AS MÉDIAS POR FREQUENCIA E POR PONTO

D ₅₀ MEDIDO SALA PG03								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,62	0,55	0,44	0,53	0,51	0,55	0,68	0,55
2	0,77	0,58	0,57	0,54	0,54	0,53	0,7	0,60
5	0,6	0,51	0,58	0,49	0,4	0,43	0,6	0,52
6	0,62	0,47	0,47	0,43	0,41	0,44	0,56	0,49
9	0,76	0,48	0,47	0,41	0,32	0,42	0,52	0,48
10	0,58	0,51	0,6	0,34	0,38	0,42	0,52	0,48
13	0,43	0,38	0,52	0,34	0,33	0,39	0,43	0,40
14	0,69	0,53	0,52	0,4	0,32	0,36	0,49	0,47
MÉDIA	0,63	0,50	0,52	0,44	0,40	0,44	0,56	0,50

D ₅₀ MEDIDO SALA PG04								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
5	0,54	0,57	0,58	0,4	0,42	0,46	0,65	0,52
8	0,59	0,42	0,39	0,45	0,46	0,5	0,61	0,49
10	0,59	0,38	0,33	0,31	0,35	0,41	0,56	0,42
11	0,5	0,32	0,36	0,35	0,41	0,4	0,58	0,42
14	0,3	0,35	0,28	0,32	0,27	0,35	0,49	0,34
15	0,45	0,28	0,46	0,32	0,33	0,37	0,52	0,39
17	0,31	0,2	0,39	0,3	0,35	0,37	0,44	0,34
20	0,45	0,3	0,36	0,24	0,31	0,33	0,42	0,34
MÉDIA	0,47	0,35	0,39	0,34	0,36	0,40	0,53	0,41

D ₅₀ MEDIDO SALA PG 05								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,79	0,78	0,79	0,82	0,85	0,87	0,89	0,83
2	0,71	0,74	0,76	0,8	0,7	0,75	0,8	0,75
3	0,86	0,8	0,83	0,81	0,8	0,86	0,84	0,83
4	0,94	0,81	0,79	0,86	0,83	0,89	0,9	0,86
5	0,74	0,68	0,7	0,77	0,8	0,81	0,89	0,77
6	0,8	0,76	0,74	0,76	0,76	0,75	0,8	0,77
7	0,61	0,77	0,79	0,82	0,8	0,82	0,87	0,78
MÉDIA	0,78	0,76	0,77	0,81	0,79	0,82	0,86	0,80

D ₅₀ MEDIDO SALA PG06								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,62	0,56	0,67	0,5	0,51	0,59	0,64	0,58
2	0,78	0,58	0,46	0,51	0,5	0,59	0,69	0,59
5	0,56	0,63	0,43	0,37	0,37	0,46	0,54	0,48
6	0,59	0,63	0,57	0,44	0,41	0,44	0,57	0,52
9	0,66	0,55	0,41	0,33	0,38	0,38	0,49	0,46

10	0,53	0,5	0,55	0,41	0,38	0,37	0,53	0,47
13	0,49	0,52	0,45	0,38	0,37	0,37	0,45	0,43
14	0,42	0,31	0,29	0,31	0,34	0,32	0,45	0,35
MÉDIA	0,58	0,54	0,48	0,41	0,41	0,44	0,55	0,48

D ₅₀ MEDIDO SALA PG07								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,56	0,55	0,54	0,52	0,66	0,66	0,73	0,60
4	0,78	0,45	0,36	0,38	0,39	0,46	0,56	0,48
6	0,56	0,3	0,32	0,3	0,42	0,49	0,6	0,43
7	0,6	0,45	0,38	0,28	0,34	0,47	0,55	0,44
10	0,34	0,3	0,26	0,28	0,34	0,36	0,48	0,34
11	0,36	0,3	0,24	0,25	0,29	0,34	0,41	0,31
13	0,33	0,23	0,28	0,22	0,31	0,38	0,43	0,31
16	0,51	0,24	0,34	0,23	0,28	0,34	0,42	0,34
MÉDIA	0,51	0,35	0,34	0,31	0,38	0,44	0,52	0,41

D ₅₀ MEDIDO SALA PG15								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,58	0,51	0,41	0,44	0,38	0,47	0,64	0,49
2	0,55	0,62	0,52	0,49	0,55	0,51	0,66	0,56
3	0,80	0,60	0,51	0,42	0,43	0,48	0,56	0,54
4	0,65	0,5	0,48	0,49	0,56	0,55	0,65	0,55
6	0,32	0,38	0,42	0,36	0,43	0,47	0,55	0,42
7	0,59	0,41	0,34	0,39	0,32	0,45	0,58	0,44
10	0,27	0,34	0,37	0,3	0,38	0,42	0,54	0,37
11	0,6	0,46	0,47	0,28	0,38	0,41	0,5	0,44
14	0,18	0,45	0,31	0,31	0,39	0,41	0,51	0,37
15	0,32	0,38	0,31	0,32	0,33	0,37	0,48	0,36
17	0,32	0,39	0,42	0,35	0,27	0,34	0,49	0,37
20	0,43	0,37	0,34	0,26	0,39	0,42	0,46	0,38
MÉDIA	0,47	0,45	0,41	0,37	0,40	0,44	0,55	0,44

D ₅₀ MEDIDO SALA PA01								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,57	0,77	0,91	0,81	0,89	0,88	0,89	0,82
4	0,78	0,65	0,86	0,86	0,85	0,79	0,87	0,81
6	0,64	0,50	0,74	0,77	0,76	0,73	0,81	0,71
7	0,57	0,56	0,76	0,82	0,81	0,77	0,79	0,73
10	0,43	0,60	0,73	0,80	0,66	0,73	0,76	0,67
11	0,33	0,55	0,71	0,79	0,81	0,73	0,73	0,66
13	0,30	0,56	0,73	0,80	0,76	0,65	0,73	0,65
16	0,20	0,68	0,70	0,73	0,72	0,65	0,75	0,63
MÉDIA	0,48	0,61	0,77	0,80	0,78	0,74	0,79	0,71

D ₅₀ MEDIDO SALA PA03								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,8	0,65	0,81	0,83	0,76	0,77	0,83	0,78
4	0,78	0,64	0,84	0,9	0,78	0,8	0,83	0,80
10	0,64	0,32	0,59	0,71	0,72	0,65	0,69	0,62

11	0,48	0,48	0,73	0,73	0,67	0,64	0,67	0,63
17	0,22	0,64	0,71	0,68	0,72	0,63	0,66	0,61
20	0,18	0,48	0,62	0,69	0,61	0,57	0,63	0,54
MÉDIA	0,52	0,54	0,72	0,76	0,71	0,68	0,72	0,66

D ₅₀ MEDIDO SALA PA05								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,72	0,66	0,82	0,80	0,75	0,73	0,79	0,75
4	0,50	0,58	0,83	0,83	0,81	0,76	0,78	0,73
6	0,55	0,42	0,70	0,79	0,75	0,72	0,75	0,67
7	0,51	0,60	0,70	0,81	0,75	0,71	0,77	0,69
10	0,57	0,45	0,64	0,77	0,65	0,60	0,66	0,62
11	0,44	0,69	0,71	0,72	0,62	0,61	0,69	0,64
13	0,24	0,69	0,71	0,79	0,64	0,66	0,67	0,63
16	0,25	0,41	0,55	0,67	0,60	0,57	0,65	0,53
MÉDIA	0,47	0,56	0,71	0,77	0,70	0,67	0,72	0,66

D ₅₀ MEDIDO SALA PA06								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,45	0,63	0,80	0,84	0,82	0,78	0,80	0,73
4	0,52	0,64	0,81	0,84	0,72	0,76	0,77	0,72
6	0,41	0,55	0,62	0,76	0,75	0,70	0,73	0,65
7	0,66	0,54	0,57	0,72	0,67	0,63	0,69	0,64
9	0,20	0,53	0,65	0,70	0,71	0,64	0,70	0,59
12	0,27	0,46	0,64	0,67	0,58	0,64	0,69	0,56
MÉDIA	0,42	0,56	0,68	0,76	0,71	0,69	0,73	0,65

**APÊNDICE C – TABELAS CONTENDO OS VALORES DE MEDIÇÃO DE T30 E AS
MÉDIA S POR FREQUENCIA E POR PONTO**

T30 (s) MEDIDO SALA PG03								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,88	0,98	1,06	1,23	1,21	1,07	0,87	1,04
2	0,74	0,87	1,00	1,24	1,17	1,06	0,89	0,99
5	0,79	0,89	1,05	1,23	1,17	1,07	0,88	1,01
6	0,82	0,88	1,04	1,23	1,19	1,06	0,89	1,02
9	0,89	0,89	0,98	1,24	1,20	1,07	0,90	1,03
10	0,80	0,95	1,04	1,22	1,22	1,08	0,90	1,03
13	0,92	0,95	1,03	1,21	1,20	1,09	0,90	1,04
14	0,88	0,99	1,03	1,22	1,17	1,07	0,90	1,04
MÉDIA	0,84	0,92	1,03	1,23	1,19	1,07	0,89	1,02

T30 (s) MEDIDO SALA PG04								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
5	1,26	1,21	1,45	1,51	1,48	1,41	1,12	1,35
8	1,27	1,25	1,47	1,52	1,46	1,41	1,11	1,36
10	1,11	1,28	1,53	1,46	1,45	1,36	1,09	1,33
11	1,24	1,25	1,52	1,44	1,41	1,35	1,12	1,33
14	1,17	1,26	1,47	1,56	1,48	1,40	1,17	1,36
15	1,15	1,27	1,59	1,55	1,51	1,39	1,14	1,37
17	1,52	1,28	1,44	1,46	1,44	1,35	1,14	1,38
20	1,45	1,36	1,52	1,49	1,46	1,34	1,13	1,39
MÉDIA	1,27	1,27	1,50	1,50	1,46	1,38	1,13	1,36

T30 (s) MEDIDO SALA PG 05								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,50	0,60	0,53	0,52	0,49	0,43	0,41	0,50
2	0,52	0,58	0,51	0,50	0,47	0,42	0,42	0,49
3	0,48	0,50	0,49	0,51	0,46	0,42	0,41	0,47
4	0,51	0,51	0,52	0,49	0,46	0,42	0,39	0,47
5	0,59	0,56	0,53	0,52	0,50	0,44	0,42	0,51
6	0,53	0,53	0,57	0,51	0,49	0,44	0,43	0,50
7	0,46	0,57	0,58	0,54	0,50	0,44	0,42	0,50
MÉDIA	0,51	0,55	0,53	0,51	0,48	0,43	0,41	0,49

T30 (s) MEDIDO SALA PG06								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,79	0,89	1,08	1,20	1,25	1,11	0,93	1,03
2	0,78	0,93	1,11	1,22	1,18	1,09	0,90	1,03
5	0,85	0,92	1,08	1,26	1,22	1,12	0,94	1,05
6	0,82	0,87	1,06	1,27	1,23	1,11	0,94	1,04
9	0,82	0,94	1,11	1,24	1,24	1,11	0,96	1,06
10	0,82	0,88	0,98	1,26	1,27	1,14	0,96	1,04

13	0,91	0,98	1,12	1,27	1,26	1,15	0,95	1,09
14	0,90	0,92	1,10	1,30	1,27	1,13	0,96	1,08
MÉDIA	0,83	0,92	1,08	1,25	1,24	1,12	0,94	1,05

T30 (s) MEDIDO SALA PG07								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	1,23	1,46	1,79	1,84	1,61	1,42	1,15	1,50
4	1,34	1,47	1,77	1,81	1,63	1,45	1,18	1,52
6	1,33	1,35	1,75	1,83	1,58	1,43	1,13	1,49
7	1,44	1,45	1,72	1,78	1,61	1,47	1,20	1,52
10	1,57	1,52	1,80	1,81	1,59	1,46	1,20	1,56
11	1,25	1,41	1,73	1,81	1,64	1,46	1,21	1,50
13	1,37	1,51	1,79	1,84	1,60	1,45	1,20	1,54
16	1,30	1,41	1,75	1,83	1,64	1,47	1,21	1,51
MÉDIA	1,35	1,45	1,76	1,82	1,61	1,45	1,19	1,52

T30 (s) MEDIDO SALA PG15								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	0,98	1,12	1,35	1,58	1,54	1,36	1,10	1,29
2	1,04	1,23	1,45	1,65	1,60	1,40	1,15	1,36
3	1,10	1,22	1,38	1,74	1,65	1,43	1,18	1,39
4	1,01	1,15	1,33	1,61	1,52	1,33	1,07	1,29
6	1,05	1,29	1,36	1,62	1,54	1,37	1,14	1,34
7	1,06	1,39	1,44	1,72	1,69	1,45	1,20	1,42
10	1,04	1,22	1,37	1,60	1,59	1,41	1,17	1,34
11	0,96	1,33	1,45	1,67	1,58	1,39	1,16	1,36
14	1,05	1,31	1,44	1,67	1,63	1,36	1,16	1,37
15	1,01	1,27	1,39	1,64	1,58	1,37	1,17	1,35
17	1,11	1,27	1,40	1,71	1,68	1,42	1,19	1,40
20	1,09	1,26	1,42	1,68	1,61	1,41	1,19	1,38
MÉDIA	1,04	1,26	1,40	1,66	1,60	1,39	1,16	1,36

T30 (s) MEDIDO SALA PA01								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	1,26	0,92	0,66	0,51	0,59	0,59	0,54	0,72
4	1,24	0,93	0,72	0,51	0,59	0,59	0,54	0,73
6	1,29	1,04	0,68	0,53	0,58	0,61	0,56	0,76
7	1,35	0,94	0,66	0,53	0,55	0,59	0,55	0,74
10	1,39	1,78	0,70	0,54	0,56	0,60	0,56	0,88
11	1,31	1,09	0,69	0,55	0,57	0,62	0,56	0,77
13	1,33	0,97	0,74	0,58	0,61	0,60	0,57	0,77
16	1,49	0,99	0,77	0,59	0,60	0,62	0,57	0,80
MÉDIA	1,33	1,08	0,70	0,54	0,58	0,60	0,56	0,77

T30 (s) MEDIDO SALA PA03								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	1,20	1,15	0,74	0,61	0,71	0,76	0,70	0,84
4	1,29	1,12	0,74	0,62	0,71	0,74	0,67	0,84
10	1,17	1,16	0,86	0,62	0,73	0,76	0,70	0,86
11	1,45	1,16	0,83	0,61	0,73	0,79	0,70	0,89

17	1,61	1,03	0,79	0,60	0,72	0,76	0,70	0,89
20	1,69	1,22	0,77	0,62	0,73	0,76	0,71	0,93
MÉDIA	1,40	1,14	0,79	0,61	0,72	0,76	0,70	0,87

T30 (s) MEDIDO SALA PA05								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	1,63	1,17	0,79	0,64	0,71	0,75	0,68	0,91
4	1,76	1,09	0,76	0,65	0,70	0,72	0,69	0,91
6	1,97	1,20	0,70	0,62	0,73	0,75	0,69	0,95
7	2,08	1,27	0,71	0,63	0,71	0,72	0,65	0,97
10	1,53	1,16	0,68	0,67	0,73	0,74	0,67	0,88
11	1,72	1,15	0,79	0,62	0,72	0,75	0,69	0,92
13	1,97	1,25	0,79	0,68	0,72	0,74	0,69	0,98
16	1,99	1,24	0,72	0,64	0,71	0,75	0,70	0,97
MÉDIA	1,83	1,19	0,74	0,64	0,72	0,74	0,68	0,93

T30 (s) MEDIDO SALA PA06								
PONTO	125	250	500	1000	2000	4000	8000	MÉDIA
1	2,01	0,97	0,76	0,55	0,63	0,65	0,60	0,88
4	1,85	1,01	0,78	0,55	0,63	0,67	0,60	0,87
6	1,79	0,95	0,75	0,55	0,63	0,66	0,59	0,85
7	1,68	0,99	0,73	0,54	0,62	0,66	0,60	0,83
9	1,90	0,99	0,78	0,55	0,65	0,67	0,62	0,88
12	1,92	0,98	0,73	0,55	0,65	0,69	0,61	0,88
MÉDIA	1,86	0,98	0,76	0,55	0,64	0,67	0,60	0,86

**APÊNDICE D – LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO NAS SALAS DE
AULA**

SALA PG03			
LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z			
PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	0,5	4,24	1,52
P01	1,9	4,2	1,48
P02	3,64	5,95	1,2
P03	3,64	2,2	1,2
P04	4,74	5,85	1,4
P05	4,74	2,2	1,4
P06	5,73	5,95	1,6
P07	5,73	2,2	1,6
P08	6,76	5,95	1,8
P09	6,76	2,2	1,8
P10	7,72	5,95	2
P11	7,72	2,2	2
P12	8,74	5,95	2,2
P13	8,74	2,2	2,2
P14	9,75	5,95	2,4
P15	9,75	2,2	2,4
P16	2,5	4,2	1,44
P17	3	2,96	1,2
P18	3	5,12	1,2
P19	4	4,2	1,4

SALA PG04			
LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z			
PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	0,65	3,7	1,6
P01	2,75	6,6	1,2
P02	2,75	3,75	1,2
P03	2,75	2,1	1,2
P04	2,75	0,77	1,2
P05	3,95	5,96	1,2
P06	3,95	4,47	1,2
P07	3,95	2,98	1,2
P08	3,95	1,5	1,2
P09	5,77	5,96	1,2

P10	5,77	4,47	1,2
P11	5,77	2,98	1,2
P12	5,77	1,5	1,2
P13	8,28	5,96	1,2
P14	8,28	4,47	1,2
P15	8,28	2,98	1,2
P16	8,28	1,5	1,2
P17	10,79	5,96	1,2
P18	10,79	4,47	1,2
P19	10,79	2,98	1,2
P20	10,79	1,5	1,2

SALA PG05

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	4,6	0,75	1,5
P01	4,6	1,75	1,2
P02	4	1,75	1,2
P03	5,6	1,75	1,2
P04	6,25	3,65	1,2
P05	5	3,65	1,2
P06	3,85	3,5	1,2
P07	4,83	5,25	1,2
P08	4,83	5,85	1,2
P09	5,35	6,55	1,2
P10	5,9	5,85	1,2
P11	5,9	5,25	1,2
P12	6,42	6,55	1,2
P13	6,94	5,85	1,2
P14	6,94	5,25	1,2

SALA PG06

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	3,5	0,79	1,5
P01	1,5	3,8	1,4
P02	5,3	3,8	1,4
P03	1,5	4,8	1,6
P04	5,3	4,9	1,6
P05	1,5	5,9	1,8

P06	5,3	5,9	1,8
P07	1,5	6,9	2
P08	5,3	6,9	2
P09	1,5	7,9	2,2
P10	5,3	7,9	2,2
P11	1,5	8,9	2,4
P12	5,3	9	2,4
P13	1,5	9,7	2,6
P14	5,3	9,7	2,6

PG07

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	0,9	3,75	1,5
P01	2	9,04	1,2
P02	2	6,39	1,2
P03	2	3,79	1,2
P04	2	1,1	1,2
P05	4,78	9,04	1,2
P06	4,78	6,39	1,2
P07	4,78	3,79	1,2
P08	4,78	1,1	1,2
P09	7,56	9,04	1,2
P10	7,56	6,39	1,2
P11	7,56	3,79	1,2
P12	7,56	1,1	1,2
P13	9,23	9,04	1,2
P14	9,23	6,39	1,2
P15	9,23	3,79	1,2
P16	9,23	1,1	1,2

SALA PG15

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	0,75	3,5	1,5
P01	3,05	6,7	1,2
P02	3,05	4,89	1,2
P03	3,05	3,07	1,2
P04	3,05	1,08	1,2
P05	4,9	6,7	1,2
P06	4,9	4,89	1,2

P07	4,9	3,07	1,2
P08	4,9	1,08	1,2
P09	6,77	6,7	1,2
P10	6,77	4,89	1,2
P11	6,77	3,07	1,2
P12	6,77	1,08	1,2
P13	8,63	6,7	1,2
P14	8,63	4,89	1,2
P15	8,63	3,07	1,2
P16	8,63	1,08	1,2
P17	9,78	6,7	1,2
P18	9,78	4,89	1,2
P19	9,78	3,07	1,2
P20	9,78	1,08	1,2

SALA PA01

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO
AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	3,60	0,90	1,50
P01	1,20	2,40	1,20
P02	2,73	2,40	1,20
P03	4,26	2,40	1,20
P04	5,79	2,40	1,20
P05	1,20	4,95	1,20
P06	2,73	4,95	1,20
P07	4,26	4,95	1,20
P08	5,79	4,95	1,20
P09	1,20	7,50	1,20
P10	2,73	7,50	1,20
P11	4,26	7,50	1,20
P12	5,79	7,50	1,20
P13	1,20	10,00	1,20
P14	2,73	10,00	1,20
P15	4,26	10,00	1,20
P16	5,79	10,00	1,20

SALA PA03

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO
AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	3,30	0,90	1,50
P01	1,20	2,40	1,20
P02	2,75	2,40	1,20
P03	4,30	2,40	1,20
P04	5,85	2,40	1,20
P05	1,20	4,68	1,20
P06	2,75	4,68	1,20
P07	4,30	4,68	1,20
P08	5,85	4,68	1,20
P09	1,20	6,80	1,20
P10	2,75	6,80	1,20
P11	4,30	6,80	1,20
P12	5,85	6,80	1,20
P13	1,20	9,00	1,20
P14	2,75	9,00	1,20
P15	4,30	9,00	1,20
P16	5,85	9,00	1,20
P17	1,20	11,20	1,20
P18	2,75	11,20	1,20
P19	4,30	11,20	1,20
P20	5,85	11,20	1,20

SALA PA05

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	3,30	0,90	1,50
P01	1,20	2,40	1,20
P02	2,75	2,40	1,20
P03	4,30	2,40	1,20
P04	5,85	2,40	1,20
P05	1,20	4,68	1,20
P06	2,75	4,68	1,20
P07	4,30	4,68	1,20
P08	5,85	4,68	1,20
P09	1,20	6,69	1,20
P10	2,75	6,69	1,20

P11	4,30	6,69	1,20
P12	5,85	6,69	1,20
P13	1,20	9,24	1,20
P14	2,75	9,24	1,20
P15	4,30	9,24	1,20
P16	5,85	9,24	1,20

SALA PA06

LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO EM RELAÇÃO
AOS EIXO X, Y E Z

PONTO	DISTANCIA DA PAREDE LATERAL	DISTANCIA DA PAREDE DO QUADRO NEGRO	ALTURA
BOCA	3,38	0,90	1,50
P01	1,20	2,40	1,20
P02	2,72	2,40	1,20
P03	4,24	2,40	1,20
P04	5,76	2,40	1,20
P05	1,20	4,30	1,20
P06	2,72	4,30	1,20
P07	4,24	4,30	1,20
P08	5,76	4,30	1,20
P09	1,20	6,20	1,20
P10	2,72	6,20	1,20
P11	4,24	6,20	1,20
P12	5,76	6,20	1,20

**APÊNDICE E – TABELA CONTENDO O RUÍDO DE FUNDO MEDIDO NAS SALAS
E USADO PARA AS SIMULAÇÕES**

RUÍDO DE FUNDO EM DECIBÉIS (dB)								
SALA	FREQUÊNCIA EM HERTZ							
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
PG 03	19,2	20,6	25,6	28,8	27,6	25,4	24,2	13,5
PG04	13,0	17,8	29,6	37,5	30,0	28,8	25,7	16,5
PG05	17,2	23,6	23,6	24,7	22,3	19,9	19,6	15,4
PG06	17,8	18,3	25,6	33,7	28,8	25,7	22,9	19,5
PG07	24,2	23,7	25,4	34,1	31,5	28,5	25,1	14,1
PG15	19,2	21,0	25,6	28,9	27,6	25,4	24,2	13,5
PA01	50,0	42,3	44,6	41,7	35,2	29,2	24,6	20,7
PA03	50,4	39,4	27,9	32,9	29,4	27,9	24,8	22,8
PA05	50,6	43,0	31,6	26,1	23,6	21,0	19,2	18,1
PA06	53,4	40,3	34,8	31,1	25,5	22,1	22,6	22,0

APENDICE F – ESQUEMA PARA MEDIÇÃO DE STI

RESUMO PARA MEDIÇÃO DE STI



computador: saída S400 com cabo fireware



placa : entrada firewire de 6 pinos



saída output1 com cabo P10



O B&k 2260 foi conectado com o cabo específico a pela saída Ó placa de som na entrada input A usando um adaptador P10



Equalizador: entrada input R c/ cabo P10



saída output R c/ cabo P10



Amplificador: entrada ChA c/ cabo P10



O conector NL4FC foi ligado a boca artificial, com o fio vermelho a entrada da boca com uma .marca branca