

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO**

JORDANA TEIXEIRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DE CONFIGURAÇÕES DAS ABERTURAS NA QUALIDADE
ACÚSTICA DE SALAS DE AULA NATURALMENTE VENTILADAS COM BASE
NA REDE PÚBLICA MUNICIPAL DE ENSINO DE MACEIÓ-AL**

Maceió

2014

JORDANA TEIXEIRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DE CONFIGURAÇÕES DAS ABERTURAS NA QUALIDADE
ACÚSTICA DE SALAS DE AULA NATURALMENTE VENTILADAS COM BASE
NA REDE PÚBLICA MUNICIPAL DE ENSINO DE MACEIÓ-AL**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Lúcia Gondim da
Rosa Oiticica

Maceió
2014

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária Responsável: Maria Auxiliadora G. da Cunha

S586i Silva, Jordana Teixeira da.
Influência de configurações das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL / Jordana Teixeira da Silva. – 2014.
136 f. : il., tabs., gráfs.

Orientadora: Maria Lúcia Gondim da Rosa Oiticica.
Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2014.

Bibliografia: f. 120-125.
Apêndices: f. 126-136.

1. Qualidade acústica. 2. Salas de aula. 3. Aberturas (janelas). I. Título.

CDU: 727.1(813.5)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

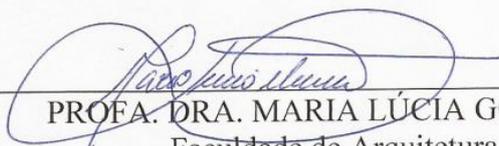
JORDANA TEIXEIRA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DE CONFIGURAÇÕES DAS ABERTURAS NA QUALIDADE
ACÚSTICA DE SALAS DE AULA NATURALMENTE VENTILADAS COM BASE
NA REDE PÚBLICA MUNICIPAL DE ENSINO DE MACEIÓ-AL**

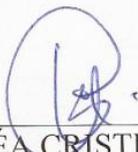
Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas
como requisito final para obtenção do grau de
Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

APROVADA EM 30 / 05 / 2014

BANCA EXAMINADORA



PROFA. DRA. MARIA LÚCIA GONDIM DA ROSA OITICICA
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL



PROFA. DRA. LÉA CRISTINA LUCAS DE SOUZA
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - UFSCar



PROFA. DRA. GIANNA MELO BARBIRATO
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL



PROFA. DRA. VERÔNICA ROBALINHO CAVALCANTI
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - UFAL

*Ao meu marido, João Paulo
À minha família*

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, pelo dom da vida e por me conceder a realização dessa etapa.

Ao meu marido, **João Paulo**, meu maior incentivador, pelo amor, apoio e dedicação em todos os aspectos da vida.

Aos meus pais, **Eraldo** e **Gilma**, e irmãos **Gustavo**, **Andressa** e **Nina**, pelo estímulo em minha caminhada.

Aos meus avós, **José** e **Carmozina**, e tia **Jailma**, pelas palavras diárias de carinho e incentivo.

À amiga **Renata Camelo**, pelos conselhos e apoio sempre presentes.

À minha orientadora, **Lucinha Oiticica**, pela extrema confiança, entusiasmo e participação.

À **banca examinadora**, pela disponibilidade e contribuições essenciais para a finalização do trabalho.

À **Elisabeth Duarte**, pela valiosa colaboração ao longo do mestrado.

Aos amigos do **LabConf**, pelas experiências vivenciadas.

Ao Grupo de Estudos do Ambiente Sonoro - **GEAS**, pela disponibilização dos projetos arquitetônicos das escolas.

Aos professores do **DEHA**, pelo aprendizado.

Às amigas de mestrado, em especial à **Renata Costa** e **Daniela Torres**, pelo incentivo.

À **CAPES** pelo suporte financeiro, ao conceder a bolsa de mestrado.

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

RESUMO

SILVA, Jordana Teixeira da. **Influência de configurações das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2014.

As condições acústicas das salas de aula podem interferir diretamente no processo de ensino e aprendizagem, ao influenciar na compreensão das palavras e na inteligibilidade da fala. Alguns componentes construtivos podem influenciar em tais condições, a exemplo das aberturas (janelas). No clima quente-úmido, as aberturas são utilizadas com a finalidade principal de proporcionar a ventilação natural. Situações de conflito entre as necessidades de conforto ambiental podem ser verificadas quando tais componentes também permitem a entrada dos ruídos externos, ocasionando decréscimo no isolamento sonoro. Além dos aspectos relacionados ao isolamento e à ventilação, torna-se necessária a abordagem da interferência das aberturas na qualidade acústica no interior dos ambientes. Nesse contexto, o objetivo da presente dissertação de mestrado consiste em avaliar a influência das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL. A metodologia consistiu em análises paramétricas, com base em resultados dos parâmetros de qualidade acústica: Tempo de Reverberação (TR), Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), obtidos por meio da simulação computacional no programa Ease 4.3. O modelo de sala de aula foi definido a partir da análise estatística da amostragem dos projetos arquitetônicos das escolas. Os modelos de simulação foram elaborados baseados na combinação das variáveis das aberturas, com a alteração exclusivamente das janelas no modelo do ambiente. Foram selecionados alguns conjuntos de arranjos (modelos) de forma que somente a variável de interesse fosse alterada. Por meio da análise e discussão dos resultados, observou-se a influência acentuada da dimensão, de modo que o aumento da área de abertura acarreta em melhorias expressivas nos valores dos parâmetros acústicos. As variáveis de localização e forma influenciam de modo discreto, porém, a variável forma apresenta a menor influência nos resultados. Visto que os resultados indicaram que a variável dimensão corresponde ao fator de maior potencial na correção dos parâmetros acústicos, realizou-se um estudo da tendência do comportamento estatístico do TR em função do percentual de área de abertura em relação à área de piso, com a finalidade de estimar os valores de percentual de abertura que atendam ao TR ótimo, e portanto, alcançar valores recomendáveis para a qualidade acústica. Além das aberturas, a possibilidade do emprego simultâneo de material absorvedor sonoro nas superfícies da sala resultou em possíveis configurações de tratamento para alcance de resultados recomendáveis de qualidade acústica para salas de aula. O conhecimento sobre o efeito das aberturas na qualidade acústica interna pode auxiliar o projeto arquitetônico no processo de tomada de decisões por parte dos arquitetos.

Palavras-chave: Qualidade acústica. Salas de Aula. Aberturas (janelas).

ABSTRACT

SILVA, Jordana Teixeira da. **Influence of configuration openings in acoustic quality of naturally-ventilated classrooms based on municipal schools of Maceió-AL.** Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas, 2014.

Classroom acoustics can directly interfere in the teaching and learning process by influencing the understanding of diction and speech intelligibility. Some construction components, including openings (windows), can influence acoustic conditions. In hot-humid climates, openings are primarily used to provide natural ventilation. Conflicts may stem between the need for a comfortable and productive learning environment when such components allow external noise, decreasing sound insulation. Thus, approaching the design of openings with interference and considering the acoustic quality of the classroom is necessary. The objective of this dissertation is to assess the influence of the size, location, and shape of openings on the acoustic quality of naturally-ventilated classrooms in the municipal schools of Maceió-AL. The methodology is based on the parametric analysis of the following acoustic quality parameters obtained via the computer simulation program Ease 4.3: Reverberation Time (RT), Clarity (C_{50}), Speech Transmission Index (STI), and Percent Loss in the Articulation of Consonants (%ALCons). The model classroom was obtained from a statistical analysis of a sample of architectural projects in schools. Simulation models were developed based on a combination of variable openings in which the only change was in the windows of the classroom model. A set of models was selected such that only the variable of interest was changed to analyze the influence of the aperture variables. Through the analysis and discussion of the results, we observed that size has a marked influence on acoustics; increased opening area causes significant improvements in the acoustic parameters. Of the variables influencing the location and shape of the openings, the form variable has the least influence on the results. Because the opening size was detected to be the variable with the greatest influence on acoustic parameters, we studied the statistical behavior of RT based on the percentage of the open area relative to the floor area. The purpose of this investigation was to estimate the opening percentage values that optimize RT, and therefore achieve the recommended values for acoustic quality. The possibility of simultaneously using sound absorbing materials on the room surfaces resulted in possible strategies for achieving good sound quality for classrooms. The knowledge of the effects of apertures on internal acoustic quality can assist in the decision-making processes for architectural design.

Keywords: Acoustic quality. Classroom. Openings (windows).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Reflexões sonoras no interior de uma sala de aula.	6
Figura 2 - Campo livre e campo reverberante em um ambiente fechado.	7
Figura 3 - Diagrama de impulsos de um ambiente: som direto, primeiras reflexões e reverberação.	8
Figura 4 - Zona de integração e ecos em função do tempo de decaimento e o nível sonoro.	9
Figura 5 - Propagação do som no obstáculo.	9
Figura 6 - Reflexão especular.	10
Figura 7 - Reflexão difusa.	10
Figura 8 - A influência da alta e baixa frequência na difração do som através do obstáculo.	12
Figura 9 - O espectro de frequência audível dividido em regiões.	13
Figura 10 - Modos de sala: axial, tangencial e oblíquo.	14
Figura 11 - Diagrama de Bolt (1946).	15
Figura 12 - Exemplo de locação das proporções das dimensões de uma sala de aula de acordo no Diagrama de Bolt (1946).	16
Figura 13 - Locação das proporções das dimensões das salas de aula no Diagrama de Bolt (1946) de salas de aula da rede pública de Campinas-SP.	16
Figura 14 - Cálculos modais de uma sala.	17
Figura 15 - Espectros típicos da voz de um orador homem para diferentes esforços vocais.	19
Figura 16 - Ângulo de cobertura da voz humana: (a) plano horizontal e (b) plano vertical.	19
Figura 17 - Tempo de Reverberação (TR).	22
Figura 18 - Valores de C_{50} e respectivas classificações.	25
Figura 19 - Fontes imagens de primeira e segunda ordem.	29
Figura 20 - Salas de aula de diferentes composição de materiais internos: (a) típica sala de aula indesejável, com superfícies rígidas; (b) sala de aula com teto e piso revestidos com material absorvedor sonoro e (c) sala de aula considerada ideal, com material absorvedor e refletor em determinadas partes.	33
Figura 21 - Localização das aberturas no interior dos ambientes: escoamento de ar distribuído e concentrado.	38
Figura 22 - Exemplo de ficha técnica do FUNDESCOLA.	39
Figura 23 - Rasgos empregados em salas de aula da rede pública municipal de ensino, em Maceió-AL.	40
Figura 24 - Perda de transmissão em um recinto em função da inserção de aberturas.	42
Figura 25 - Elemento vazado (cobogó) com isolamento sonoro, do tipo "caixa", desenvolvido por Araújo (2010). (a) croqui esquemático das dimensões do bloco; (b) croqui do elemento instalado, para ilustrar a cavidade de passagem.	43
Figura 26 - Desenhos esquemáticos do peitoril ventilado. (a), (b) Cortes esquemáticos e (c) Esquema da passagem de ventilação através do duto (cavidade) do peitoril.	44
Figura 27 - Passagem do som de uma mesma frequência através de aberturas de três tamanhos diferentes.	45
Figura 28 - Passagem do som através de uma pequena abertura.	45
Figura 29 - Resultados dos coeficientes médios de absorção medidas das diferentes configurações de aberturas, plotados em função de uma frequência normalizada (ka).	47

Figura 30 - Exemplo de resultado em formato de mapa acústico obtido através do programa Ease 4.3.....	58
Figura 31 - Tipologias de janelas predominantes, empregadas nas salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL. (a) Janela do tipo basculante. (b) Janela do tipo pivotante vertical.....	63
Figura 32 - Tipologias dos rasgos predominantes, empregadas nas salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL: (a) Rasgos com um cilindro de ferro galvanizado. (b) Rasgos com dois cilindros de ferro galvanizado.....	64
Figura 33 - Sala de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, com a indicação dos materiais de acabamento interno predominantes, além da indicação da disposição das aberturas em relação às paredes.....	64
Figura 34 - Parede que contém os rasgos e a porta.....	68
Figura 35 - Modelo da sala de aula: planta-baixa (dimensões em metros).....	69
Figura 36 - Modelo da sala de aula: elevações (dimensões em metros).....	70
Figura 37 - Modelo da sala de aula no Ease 4.3, com a representação das características.....	70
Figura 38 - Locação das proporções das dimensões das salas de aula no Diagrama de Bolt (1946).	74
Figura 39 - Locação das proporções das dimensões das Salas de aula 1, 2 e 3, 4 e 5 no Diagrama de Bolt, (1946) após o redimensionamento da dimensão do pé-direito.....	76
Figura 40 - Cálculos modais realizados na <i>Planilha Modos</i> (2013) da Sala Modelo.....	77
Figura 41 - Modelo de sala de aula.....	77
Figura 42 - Modelo de sala de aula em planta-baixa, com a representação da fonte sonora e assentos/área de audiência.....	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de STI e respectivas classificações	26
Tabela 2 - Valores de %ALCons e respectivas classificações	27
Tabela 3 - Valores recomendáveis do Tempo de Reverberação (TR).....	32
Tabela 4 - Parâmetros acústicos com seus respectivos valores recomendáveis.	60
Tabela 5 - Amostragem das salas de aula contabilizadas da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL: áreas, número de salas, relação ao total de 502 salas (%), dimensões e volume.	65
Tabela 6 - Contabilização dos percentuais de aberturas (janelas e rasgos) em relação à área de piso das salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.....	65
Tabela 7 - Contabilização dos percentuais de aberturas (rasgos) em relação à área de piso das salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.....	66
Tabela 8 - Variável dimensão das aberturas: percentual de abertura em relação à área de piso, áreas de aberturas e representação das dimensões da janela na parede.....	68
Tabela 9 - Coeficientes de absorção sonora (α) dos materiais componentes do modelo de sala de aula utilizado nas simulações acústicas.....	71
Tabela 10 - Proporções das dimensões de pé-direito, largura e comprimento das salas de aula, para análise do Diagrama de Bolt (1946).....	74
Tabela 11 - Redimensionamento da dimensão do pé-direito das Salas 1, 2 e 3 para adequação das proporções das dimensões na Área de Bolt, na Escala do Diagrama de Bolt (1946).....	75
Tabela 12 - Coeficientes de absorção do teto em função do percentual de área de abertura para atingir Tempo de Reverberação (TR) ótimo da sala em estudo	111
Tabela 13 - Coeficientes de absorção da parede em função do percentual de área de abertura para atingir Tempo de Reverberação (TR) ótimo da sala em estudo	111
Tabela 14 - Coeficientes de absorção do teto e parede em função do percentual de área de abertura para atingir Tempo de Reverberação (TR) ótimo da sala em estudo	112
Tabela 15 - Síntese dos resultados do Tempo de Reverberação (TR) (500Hz), classificação dos resultados nos assentos críticos relativos aos parâmetros: Clareza (C_{50}) (500Hz), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)	114

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Listagem das variáveis das aberturas: dimensão, localização, forma e tipologia.	54
Quadro 2 - Variável localização das aberturas: disposição das janelas em planta.	55
Quadro 3 - Variável forma das aberturas.	55
Quadro 4 - Conjuntos de arranjos das aberturas selecionados para a simulação acústica: variáveis dimensão, localização e forma das aberturas.	59
Quadro 5 - Arranjos das aberturas avaliadas segundo a variável de dimensão.....	78
Quadro 6 - Arranjos das aberturas avaliadas segundo a variável de localização.....	84
Quadro 7 - Arranjos I das aberturas avaliadas segundo a variável forma.....	88
Quadro 8 - Grupo B das aberturas avaliadas segundo a variável forma.....	90
Quadro 9 - Mapas acústicos: efeito da variável de dimensão das aberturas na disposição espacial de Clareza (C_{50}), na frequência de 500Hz.....	95
Quadro 10 - Mapas acústicos: efeito da variável de dimensão das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).....	97
Quadro 11 - Mapas acústicos: efeito da variável de localização das aberturas na disposição espacial de Clareza (C_{50}), na frequência de 500Hz.....	99
Quadro 12 - Mapas acústicos: efeito da variável de localização das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).....	101
Quadro 13 - [GRUPO A] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial da Clareza (C_{50}) (na frequência de 500Hz).....	102
Quadro 14 - [GRUPO B] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial da Clareza (C_{50}) (na frequência de 500Hz).....	103
Quadro 15 - [GRUPO A] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).....	104
Quadro 16 - [GRUPO B] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).....	105
Quadro 17 - Mapas acústicos do modelo com 80% de área de abertura: (C_{50}) (500Hz), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).....	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável de dimensão das aberturas	79
Gráfico 2 - Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável de dimensão das aberturas	80
Gráfico 3 - Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável de dimensão das aberturas	81
Gráfico 4 - Resultados da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável de dimensão das aberturas	82
Gráfico 5 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável de localização das aberturas	84
Gráfico 6 - Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável de localização das aberturas.....	86
Gráfico 7 - Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável de localização das aberturas.....	86
Gráfico 8 - Resultados da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável de localização das aberturas.....	87
Gráfico 9 - Grupo A: Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável forma das aberturas	88
Gráfico 10 - Grupo A: Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável forma das aberturas.....	89
Gráfico 11 - Grupo A: Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável forma das aberturas	89
Gráfico 12 - Grupo A: Resultados da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável forma das aberturas	90
Gráfico 13 - Grupo B: Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável forma das aberturas	91
Gráfico 14 - Grupo B: Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável forma das aberturas.....	91
Gráfico 15 - Grupo B: Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável forma das aberturas	92
Gráfico 16 - Grupo B: Resultados do Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável forma das aberturas	92
Gráfico 17 - Curva de tendência para a correlação Tempo de Reverberação (TR) (500Hz) e percentual de área de abertura em relação à área de piso	106
Gráfico 18 - Tempo de Reverberação (TR) (500Hz) para sala com 80% de percentual de abertura em relação à área de piso.....	107
Gráfico 19 - Clareza (C_{50}) (500Hz) para sala com 80% de percentual de abertura em relação à área de piso.....	108
Gráfico 20 - Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) para sala com 80% de percentual de abertura em relação à área de piso	108

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1 REFERENCIAL TEÓRICO	4
1.1 O AMBIENTE ESCOLAR	5
1.2 ACÚSTICA DE SALAS	6
1.2.1 Propagação do Som no Interior de Uma Sala	6
1.2.2 Teorias Acústicas no Estudo do Comportamento Sonoro de Salas	12
1.2.3 Inteligibilidade da Fala	17
1.2.4 Parâmetros de Qualidade Acústica	20
1.2.5 Simulação Computacional Acústica de Salas	27
1.3 QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS DE AULA	30
1.3.1 Recomendações para Qualidade Acústica de Salas de Aula	30
1.3.2 Qualidade Acústica de Salas de Aula no Brasil	33
1.4 ABERTURAS	36
1.4.1 Importância das Aberturas para Ventilação Natural em Regiões de Clima Quente e Úmido	37
1.4.2 Enfoque Acústico das Aberturas para Regiões de Clima Quente e Úmido	41
1.5 SÍNTESE DA SEÇÃO	48
2 METODOLOGIA	50
2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS	51
2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SALAS DE AULA E DAS ABERTURAS	52
2.2.1 Materiais de acabamento internos das salas de aula e tipologias das aberturas	52
2.2.2 Dimensões dos ambientes e percentuais de aberturas	52
2.3 DEFINIÇÃO DO MODELO DE SALA DE AULA	53
2.4 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS: DIMENSÃO, LOCALIZAÇÃO E FORMA DAS ABERTURAS	54
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACÚSTICA	57
2.5.1 O programa de simulação computacional acústica	57
2.5.2 Os parâmetros acústicos avaliados	58
2.6 TRATAMENTO DOS DADOS	58
2.6.1 Influência da Dimensão, Localização e Formas das Aberturas nos Resultados dos Parâmetros Acústicos	58
2.6.2 Distribuição Espacial dos Resultados dos Parâmetros Acústicos na Sala de Aula	60

2.6.3	Obtenção de Resultados Recomendáveis de Parâmetros Acústicos com Base na Influência das Aberturas	61
2.6.4	Uso Combinado de Aberturas e Materiais Absorvedores para Obtenção de Resultados Recomendáveis de Parâmetros Acústicos.....	62
2.7	MODELOS PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	62
2.7.1	Materiais de acabamento internos das salas de aula e tipologias das aberturas.....	63
2.7.2	Dimensões dos ambientes e percentuais de aberturas.....	64
2.7.3	Arranjos das aberturas (combinações das variáveis)	66
2.7.4	Configuração dos modelos de simulação computacional	69
3	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
3.1	ANÁLISE DAS DIMENSÕES DAS SALAS DE AULA.....	73
3.2	INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DAS ABERTURAS	77
3.2.1	Influência da Dimensão das Aberturas	78
3.2.2	Influência da Localização das Aberturas	83
3.2.3	Influência da Forma das Aberturas	87
3.3	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS RESULTADOS DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS NAS SALAS DE AULA	93
3.3.1	Influência da Dimensão das Aberturas na Distribuição Espacial dos Resultados	93
3.3.2	Influência da Localização das Aberturas na Distribuição Espacial dos Resultados	98
3.3.3	Influência da Forma das Aberturas na Distribuição Espacial dos Resultados	102
3.4	OBTENÇÃO DE RESULTADOS RECOMENDÁVEIS DE PARÂMETROS ACÚSTICOS COM BASE NA INFLUÊNCIA DAS ABERTURAS	105
3.5	USO COMBINADO DE ABERTURAS E MATERIAIS ABSORVEDORES PARA OBTENÇÃO DE RESULTADOS RECOMENDÁVEIS DE PARÂMETROS ACÚSTICOS.....	110
3.6	SÍNTESE DOS RESULTADOS	112
	CONCLUSÃO	116
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
	APÊNDICES.....	126
	APÊNDICE A.....	127
	APÊNDICE B.....	130
	APÊNDICE C.....	131
	APÊNDICE D.....	132
	APÊNDICE E.....	133
	APÊNDICE F.....	134
	APÊNDICE G.....	135
	APÊNDICE H.....	136

INTRODUÇÃO

As edificações escolares desempenham importante papel na formação cultural e intelectual da sociedade, pois são espaços destinados ao desenvolvimento do processo de ensino e aprendizagem. Portanto, o ambiente escolar deve proporcionar condições favoráveis ao desenvolvimento das atividades de seus usuários.

Tendo em vista que na sala de aula a comunicação oral corresponde ao principal mecanismo de transmissão do conhecimento, a aprendizagem está relacionada diretamente à compreensão das palavras e à inteligibilidade. As condições acústicas desfavoráveis das salas de aula, além de dificultarem o processo de ensino e aprendizagem, favorecem a perda de concentração e provocam desgaste físico e psicológico nos seus usuários (alunos e professores). A qualidade acústica e níveis de inteligibilidade da fala adequados são essenciais.

A qualidade acústica de um ambiente depende de alguns aspectos, tais como, a forma geométrica do ambiente, o volume, a absorção acústica dos materiais internos, fontes sonoras, bem como seu entorno e efeitos das aberturas no ambiente. Alguns estudos relacionam a influência das características arquitetônicas do ambiente com os resultados nos parâmetros acústicos. Conforme indica Losso (2003) e Amorim (2007), a aplicação da simulação acústica, diferentemente de ensaios e medições em salas reais, permite analisar a influência de variáveis, componentes e características arquitetônicas de maneira isolada na qualidade acústica de salas de aula. Na simulação, torna-se possível a identificação do grau de importância de aspectos como: componentes, materiais de acabamento, mobiliário e equipamentos, em relação aos parâmetros acústicos. O estudo dos diversos aspectos que envolvem a qualidade acústica das salas de aula necessita de um maior número de pesquisas, tendo em vista a necessidade de estabelecimentos de critérios de qualidade acústica.

Visto a necessidade de atendimento aos requisitos de conforto ambiental no contexto da arquitetura escolar, verifica-se que em regiões de clima tropical, como o Brasil, o conflito entre as recomendações de projeto baseados no conforto ambiental são constantes. Nesse sentido, as aberturas são elementos significativos de tal conflito. Se por um lado, torna-se necessária a inserção de aberturas para a entrada da ventilação natural, a fim de atender às exigências de conforto térmico, por outro lado, observa-se que as aberturas tornam as salas

sujeitas ao ruído ambiental, o que conseqüentemente pode trazer prejuízos à inteligibilidade da fala, a depender do incômodo gerado pelo ruído.

Verifica-se a existência de estudos relativos à interferência de elevados níveis de ruído externo que penetram nas edificações escolares, que por sua vez prejudicam a qualidade acústica das salas de aula. Nesse sentido, elementos de vedação externa, como as aberturas, geralmente são apontados como pontos de maior permeabilidade do som, sendo objeto de estudo em trabalhos direcionados para a temática do isolamento acústico das edificações.

A acústica de salas dedica-se ao estudo de ambientes fechados. No entanto, espaços abertos, com a existência de aberturas (janelas), são frequentemente projetados e necessitam de estudos, devido à necessidade da utilização da ventilação natural como estratégia¹ para resfriamento térmico passivo, particularmente em climas quente e úmido, como é o caso de Maceió-AL, bem como da necessidade em garantir condições acústicas favoráveis ao desenvolvimento das atividades nos ambientes, de acordo com o seu uso. Portanto, torna-se necessária a abordagem da interferência das aberturas na determinação da qualidade acústica no interior dos ambientes.

Diante das recomendações em relação aos vãos de aberturas para ventilação natural, a exemplo da NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005), ao sugerir grandes áreas de abertura, implicações além dos aspectos de ventilação natural e isolamento acústico necessitam de estudos, a exemplo do efeito das aberturas do ponto de vista do comportamento sonoro dos ambientes, e conseqüentemente, suas implicações em relação aos parâmetros de qualidade acústica.

Em função da significativa importância das aberturas, por serem consideradas como elementos de controle ambiental, as variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas consistem em aspectos importantes no projeto arquitetônico de uma sala de aula. Em virtude das janelas serem os principais elementos de abertura empregados nesses ambientes, o presente estudo baseou-se nas variáveis de dimensão, localização e forma de tais componentes arquitetônicos, por se tratarem de aspectos que podem ser decididos pelo arquiteto e podem interferir na qualidade acústica.

Em relação à abrangência da pesquisa, aspectos como a regularidade da planta do ambiente em estudo, a sala de aula, além das variáveis de dimensão, localização e forma das

¹ O resfriamento por meio da ventilação natural consiste na principal estratégia bioclimática para amenizar o desconforto que costuma acontecer a partir da combinação entre as temperaturas altas e a elevada umidade existente.

aberturas correspondem a aspectos a serem considerados na concepção projetual, viabilizam a elaboração de modelos representativos com aproximação satisfatória da realidade.

OBJETIVOS

Objetivo Geral: Avaliar a influência das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.

Objetivos Específicos:

- a) Adequar as dimensões (largura, comprimento e pé-direito) das salas de aula recorrentes em Maceió-AL, para atendimento de proporções preferenciais de dimensões para qualidade acústica;
- b) Quantificar e mapear os efeitos dos parâmetros de qualidade acústica em salas de aula, de acordo com as alterações das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas;
- c) Identificar configurações para obtenção de resultados recomendáveis de parâmetros acústicos, com base na influência das aberturas na qualidade acústica.

Estrutura da dissertação

Este documento compõe-se de três seções principais, divididos da seguinte forma:

Na **seção 1** é apresentada uma síntese da revisão bibliográfica, que por sua vez constitui-se o referencial teórico do trabalho.

A **seção 2** trata da metodologia da pesquisa, com a descrição do objeto de estudo, os procedimentos metodológicos realizados para o alcance dos objetivos propostos, apresentação dos critérios para a obtenção dos dados e a forma de análise dos mesmos.

Na **seção 3** estão apresentados os resultados e as discussões da pesquisa, tendo em vista os objetivos propostos.

Na **Conclusão** são apresentadas as considerações finais do trabalho, além das limitações da pesquisa e sugestões de trabalhos futuros.

1 REFERENCIAL TEÓRICO

O presente capítulo destina-se à abordagem de conceitos relevantes para compreensão dos fenômenos acústicos que ocorrem dentro de uma sala, a fim de subsidiar a investigação a respeito da influência das aberturas na qualidade acústica de salas de aula. Para tanto, são apresentadas as seguintes temáticas: o ambiente escolar, a acústica de salas, qualidade acústica de salas de aula e aberturas.

1.1 O AMBIENTE ESCOLAR

O espaço físico escolar se constitui a partir do projeto de arquitetura. A concepção de ambientes de ensino depende do contexto socioeconômico e político, mas deve atender aos conceitos educacionais e aos aspectos de conforto ambiental, que por sua vez são necessários para o alcance da qualidade do sistema de ensino e aprendizagem (KOWALTOWSKI, 2011).

A correlação entre a qualidade do ambiente construído e a aprendizagem pode ser observada no trabalho de Schneider (2002), no qual apontou-se que as condições de conforto ambiental em salas de aula, a exemplo da qualidade do ar, ventilação, conforto térmico, lumínico e acústico são fatores que influenciam no desempenho acadêmico dos alunos. De Giuli, Da Pos e De Carli (2012) salientam que a execução de tarefas, ou seja, trabalhar ou estudar em um ambiente confortável favorece o bem-estar, satisfação, bem como a produtividade e a aprendizagem.

Para adequação da arquitetura escolar, alguns contextos devem ser considerados, tais como: (i) as escolas devem possuir níveis satisfatórios de condições acústicas no interior dos recintos, pois o conforto acústico consiste em um dos aspectos mais determinantes na comunicação entre alunos e professores, inteligibilidade da fala e concentração; (ii) situações de desconforto causadas pela falta de ventilação adequada, elevados níveis de umidade relativa do ar, combinados com altas temperaturas, prejudicam a obtenção do conforto térmico.

Tendo em vista os inúmeros aspectos que devem ser considerados no projeto do ambiente escolar, a concepção das aberturas no ambiente construído requer decisões de projeto que busquem uma compatibilização entre as diversas necessidades de conforto ambiental, visto que tais componentes construtivos podem ser responsáveis pelo controle das variáveis ambientais no interior dos ambientes.

1.2 ACÚSTICA DE SALAS

Com o intuito de compreender a influência das aberturas na qualidade acústica de salas de aula, torna-se necessária a abordagem dos principais aspectos que envolvem o comportamento sonoro no interior dos ambientes.

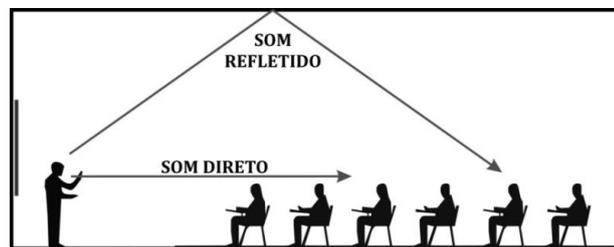
A acústica de salas consiste em uma das áreas da acústica arquitetônica destinada ao estudo de como o som é criado, propagado, percebido, medido e modelado dentro de um ambiente fechado, como por exemplo, salas de aula, teatros, auditórios, estúdios, entre outros. As condições acústicas de uma determinada sala devem proporcionar um ambiente sonoro favorável à compreensão da mensagem sonora, principalmente em espaços destinados à palavra falada e à música.

1.2.1 Propagação do Som no Interior de Uma Sala

No interior de uma sala, o som se propaga a partir da fonte sonora e pode atingir o ouvinte de forma direta ou indireta. O som proveniente diretamente da fonte sonora que atinge o receptor é chamado de som direto. O som que atinge o receptor de maneira indireta, proveniente de todas as direções, após ter se chocado com as superfícies limites da sala (a exemplo das paredes, piso e teto), é chamado de som refletido ou reverberante.

A influência do ambiente na percepção sonora deve-se principalmente às diversas reflexões que alcançam o ouvinte (BISTAFA, 2006). Na Figura 1, pode-se observar a representação da incidência do som direto e do som refletido numa sala de aula, que por sua vez, possui como fonte sonora a voz do professor.

Figura 1 - Reflexões sonoras no interior de uma sala de aula.



Fonte: Adaptado de Brüel & Kjaer (2005, p.02).

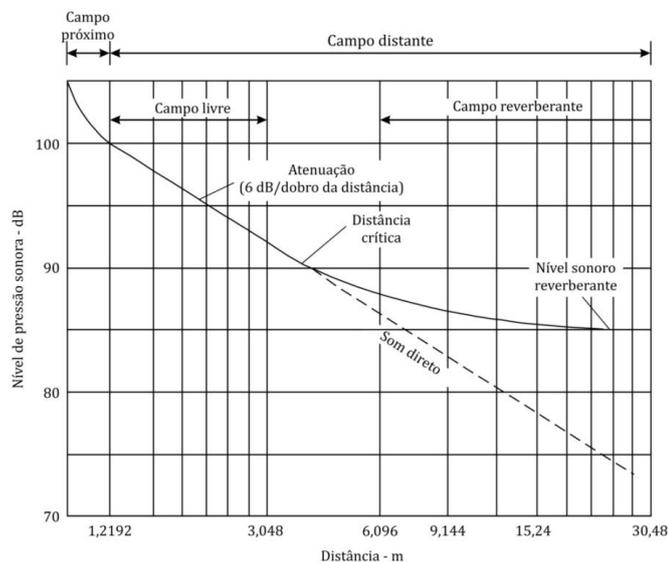
Numa sala, há a formação de dois campos sonoros, o campo livre² e o campo reverberante. O campo livre ocorre próximo à fonte, onde o som direto domina. Nesta região,

² Na prática, o *campo livre* é reproduzido numa sala chamada câmara anecóica, onde todas as superfícies (paredes, piso e teto) são revestidas com materiais absorvedores, a fim de eliminar as reflexões sonoras.

o nível sonoro decai 6 dB à medida que se dobra a distância entre a fonte e o receptor (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

O campo reverberante ocorre na área distante da fonte sonora, onde o nível sonoro torna-se constante, de maneira que o som predominante é o som refletido. Numa sala, a mudança das condições de campo livre para campo reverberante ocorre de modo gradual e depende da quantidade de absorção sonora das superfícies e elementos internos do ambiente (Figura 2). De acordo com Everest (2001), na transição do campo livre para o campo reverberante, existe a distância crítica, local onde o nível de pressão do som direto é igual ao nível de pressão sonora do som reverberante.

Figura 2 - Campo livre e campo reverberante em um ambiente fechado.



Fonte: Adaptado de Everest (2001, p. 37).

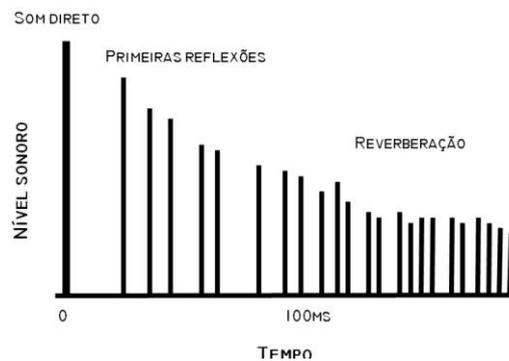
O som direto e o som refletido podem ou não atingir o receptor simultaneamente. O som refletido pode alcançar o ouvinte com certo atraso em relação ao som direto. A diferença entre o tempo de chegada do som direto e o som refletido é chamado de *delay time*. Geralmente, as ondas refletidas atingem os ouvintes de modo tão rápido, que não são ouvidas como repetições distintas do som original. Tal característica justifica-se pela capacidade do ouvido humano em integrar sons idênticos, desde que o intervalo entre o som refletido e som direto seja de até 50-80ms após o som direto (BISTAFÁ, 2006).

Geralmente, após a interrupção da fonte sonora, há um gradual decréscimo do nível sonoro no decorrer do tempo. Para compreender a distribuição temporal do som em um ambiente, é necessário observar o decaimento do nível de pressão sonora. Tendo em vista que as reflexões, também chamadas de impulsos, não são percebidas como sons distintos ao longo

do tempo, e sim como prolongamento do som original, pode-se afirmar que essa integração contínua e regular do decaimento sonoro consiste no fenômeno de reverberação.

A distribuição temporal do som pode ser representada por meio do diagrama de impulsos, também chamado de ecograma, no qual o eixo vertical representa o nível sonoro e o eixo horizontal consiste no tempo de chegada dos impulsos. Na Figura 3, o diagrama de impulsos apresenta o som direto, as primeiras reflexões e a reverberação. O som direto corresponde ao som que parte da fonte sonora e atinge diretamente o receptor. As primeiras reflexões são resultantes das reflexões que incidem nas superfícies do recinto. Segundo Mehta, Johnson e Rocafort (1999), em relação ao som da fala, as primeiras reflexões são aquelas que chegam até 50ms após o som direto. Depois das primeiras reflexões, o som passa a ser chamado de reverberante.

Figura 3 - Diagrama de impulsos de um ambiente: som direto, primeiras reflexões e reverberação.



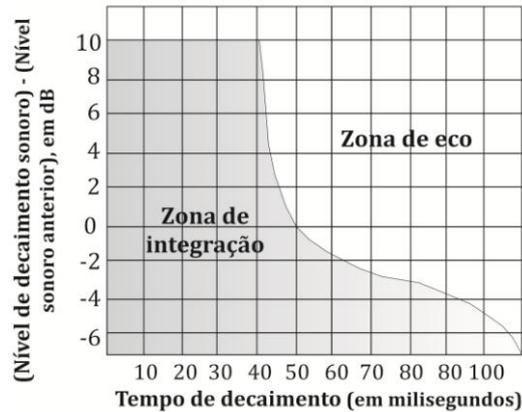
Fonte: Adaptado de Barron (2010, p.17).

As reflexões sonoras que chegam ao ouvinte depois do intervalo entre 50-80ms após o som direto, podem ser percebidas como sons distintos, ocasionando a formação de ecos, conforme aponta Bistafa (2006). Em ambientes designados à fala, os ecos interferem negativamente na comunicação.

Ao estudar a capacidade do ouvido humano em integrar os sons, Helmut Haas, a partir de experimentos, concluiu que quando o tempo de decaimento sonoro final for nulo e o níveis de dois sons forem iguais, tais sons atingem o ouvinte simultaneamente, percebendo assim, como um único som (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). Assim, Haas descobriu que além do tempo de decaimento do som no ambiente, a formação dos ecos também depende da diferença de nível do decaimento sonoro final e do nível sonoro das reflexões iniciais. Através da Figura 4, é possível identificar que a integração sonora de dois sons de mesmo nível (0 dB

de diferença), ao decaírem, ocorre no tempo máximo de intervalo de até 50ms, portanto, dentro da zona de integração.

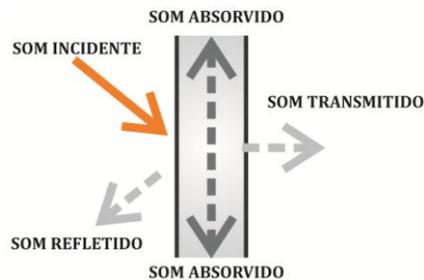
Figura 4 - Zona de integração e ecos em função do tempo de decaimento e o nível sonoro.



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.32).

Em relação à incidência do som nas superfícies internas de um ambiente, parte da energia sonora é absorvida e transmitida, e parte é refletida de volta ao recinto (Figura 5).

Figura 5 - Propagação do som no obstáculo.



Fonte: Adaptado de Carvalho (2006, p. 55).

Os fenômenos resultantes da propagação sonora no interior do ambiente, podem ser os seguintes: reflexão (especular ou difusa), absorção, transmissão e difração.

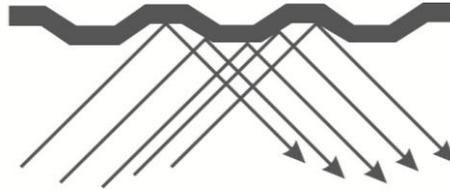
O fenômeno **reflexão** consiste na mudança de direção da propagação das ondas sonoras, depois de incidirem na superfície (obstáculo), sendo refletidas de volta para o ambiente de origem. A reflexão sonora dos elementos é determinada através do coeficiente de reflexão, denominado pelo símbolo grego *rho* (ρ):

$$\rho = \frac{\text{energia sonora refletida}}{\text{energia sonora incidente}} \quad (\text{Equação 1})$$

A reflexão sonora pode ser especular ou difusa. Na reflexão especular, o ângulo de incidência em relação à normal da superfície é igual ao ângulo de reflexão, de acordo com a

Lei da Reflexão Sonora. A reflexão especular pode ocorrer em superfícies lisas, ou no caso de superfícies com textura, o comprimento das irregularidades da superfície deve ser muito menor do que os comprimentos de onda³ do som (λ) (Figura 6).

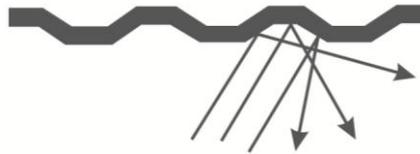
Figura 6 - Reflexão especular.



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.49).

Em relação à reflexão difusa, ao contrário da reflexão especular, a onda sonora incidente na superfície rugosa e irregular é refletida em diversas direções. Tal efeito de espalhamento de energia, justifica-se pelo fato do comprimento das irregularidades ser maior do que o comprimento de onda (λ). A Figura 7, a seguir, representa o fenômeno de reflexão difusa.

Figura 7 - Reflexão difusa.



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.49).

A **absorção** sonora é um fenômeno que resulta da alteração de energia sonora em outra forma de energia, geralmente calor, e ocorre quando uma superfície absorve as ondas sonoras que atingem a superfície. A capacidade de absorção de um material é indicada pelo coeficiente de absorção, representado pela letra grega *alpha* (α). O coeficiente de absorção sonora é definido como a razão entre a energia absorvida (E_a), e a energia incidente (E_i), conforme a equação a seguir:

$$\alpha = \frac{E_a}{E_i} \quad \text{(Equação 2)}$$

O valor do coeficiente de absorção dos materiais pode variar entre 0 (zero) e 1 (um) e pode ser representado em valor percentual. O coeficiente de absorção varia em função da

³ Comprimento de onda, representada pela letra grega (λ), sendo $\lambda = c/f$, é definido como a distância entre dois picos consecutivos de pressão acústica, ou seja, entre dois pontos similares.

frequência do som, de modo que o coeficiente (α) não é o mesmo para sons graves, médios e agudos. Materiais que possuem coeficientes de absorção maiores que 0,5 são considerados absorvedores sonoros, enquanto os materiais com coeficientes menores que 0,2 são denominados de refletores sonoros (EGAN, 1988).

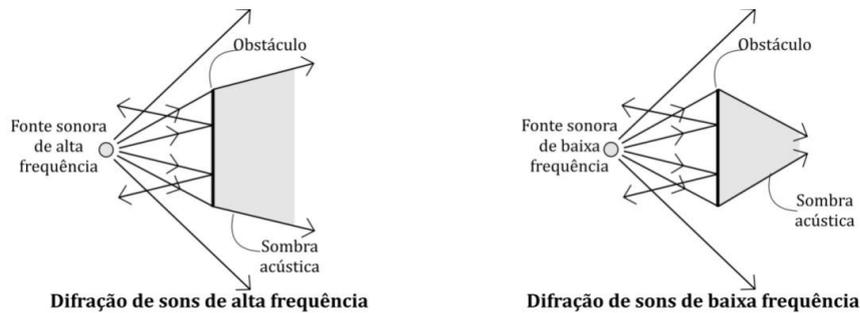
Em relação ao fenômeno **transmissão**, a parcela do som transmitido por meio dos elementos que compõem o recinto depende da parcela de energia sonora que o meio deixou de refletir ou de absorver. A fração do som incidente, que é transmitido através das superfícies, é denominado de coeficiente de transmissão, representado pela letra grega *tau* (τ). Dessa forma, a quantidade de energia sonora refletida (ρ), absorvida (α) e transmitida (τ) é igual à energia incidente:

$$\rho + \alpha + \tau = 1,0 \quad \text{(Equação 3)}$$

A densidade dos elementos componentes das superfícies de um ambiente interfere consideravelmente nos fenômenos de reflexão, absorção e transmissão sonora. Um exemplo disso são os elementos rígidos, de maior densidade, são mais reflexivos e podem apresentar baixa absorção sonora.

O fenômeno de **difração** ocorre quando as ondas sonoras sofrem um desvio diante de um obstáculo ou uma abertura de tamanho similar ao seu comprimento de onda (λ). Se a largura do obstáculo for menor do que o comprimento de onda, o som continua a propagar-se, e assim, contorna o obstáculo e atravessa a abertura, sem sofrer nenhuma variação. Por outro lado, se a largura do obstáculo for maior ou igual ao comprimento de onda, haverá distorção da onda sonora. Tendo em vista que a difração depende das dimensões do elemento (obstáculo e/ou abertura) em relação ao comprimento de onda e da frequência sonora, sons de baixa frequência (sons graves, portanto de maiores comprimentos de onda) contornam os obstáculos mais facilmente e tendem a sofrer maiores desvios de curvatura em torno do obstáculo, se comparados aos sons de alta frequência (sons agudos, portanto de menores comprimentos de onda). Em relação à região de sombra acústica formada após o obstáculo, observa-se que sons de alta frequência produzem maiores sombras acústicas, se comparados aos sons de baixa frequência (Figura 8).

Figura 8 - A influência da alta e baixa frequência na difração do som através do obstáculo.



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.40).

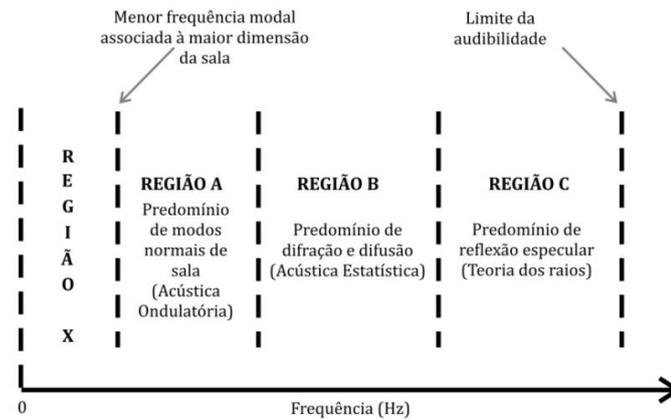
1.2.2 Teorias Acústicas no Estudo do Comportamento Sonoro de Salas

A qualidade acústica de um ambiente depende de alguns aspectos, tais como, a forma geométrica do ambiente, o volume, a absorção acústica dos materiais internos, fontes sonoras, espectros e diretividade da fonte sonora, posicionamento, reflexões e difrações das paredes e elementos internos e efeitos das aberturas no ambiente (GERGES, 2000).

A fim de estimar o comportamento sonoro em salas, é conveniente considerar o espectro audível, conforme afirma Ballou (1991), pois a frequência do som e as dimensões da sala influenciam no condicionamento acústico. O referido autor sugere a divisão do espectro audível em quatro regiões, onde em cada uma são apontadas as respectivas teorias acústicas mais adequadas para a previsão do comportamento sonoro: a Acústica Ondulatória (teoria de ondas), a Acústica Estatística (teoria estatística) e a Acústica Geométrica (teoria de raios).

Como pode ser observado na Figura 9, a região A, de baixa frequência, a Acústica Ondulatória é a teoria mais indicada para a análise, visto a predominância dos modos normais de sala. Na região B, transição entre as baixas e médias frequências, predomina-se a difração e a difusão, sendo a Acústica Estatística a teoria mais indicada. Na região C, verifica-se o predomínio da reflexão especular, fenômeno semelhante ao comportamento dos raios de luz (ótica geométrica), por essa razão, a Acústica Geométrica é a mais adequada para o estudo.

Figura 9 - O espectro de frequência audível dividido em regiões.



Fonte: Adaptado de Ballou (1991, p. 45).

O ponto de transição entre a região A (Acústica Ondulatória) e a B (Acústica Estatística) é determinada pela frequência de Schröder (SCHRÖEDER; KUTTRUFF, 1962), chamada de frequência de corte da sala. A frequência de Schröder consiste na frequência limite acima da qual a teoria de raios acústicos é válida (GERGES, 2000). Schröder e Kuttruff (1962) determinaram a frequência de corte através da seguinte expressão:

$$f_c = 2000 \sqrt{\frac{TR}{V}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

f_c = Frequência de Schröder (frequência de corte);

TR = Tempo de Reverberação, em segundos;

V = Volume do ambiente, em m³.

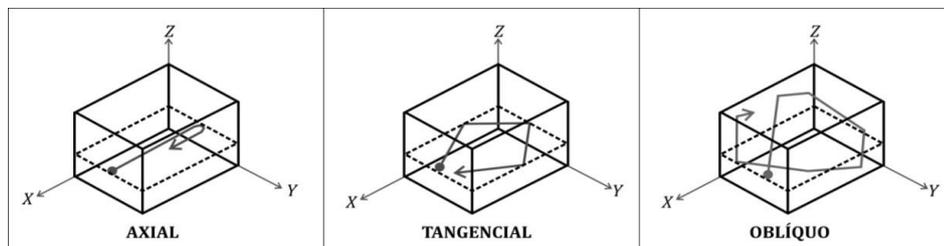
Portanto, abaixo da frequência de corte (SCHRÖEDER; KUTTRUFF, 1962), o estudo acústico das salas deve ser baseado na acústica ondulatória, e acima dessa frequência, deve-se trabalhar com a acústica estatística e geométrica. Em ambientes fechados e de dimensões reduzidas, as ondas sonoras de baixa frequência podem apresentar comprimentos de onda que se tornam grandes em comparação com as dimensões do ambiente, ocasionando a formação de ondas estacionárias.

As ondas estacionárias são formadas a partir da superposição de ondas de mesma frequência, mesma amplitude, mesmo comprimento de onda, mesma direção, mas que se propagam em sentidos opostos, originadas pelo efeito de reflexão das ondas nas paredes das salas. De acordo com Mehta, Johnson e Rocafort (1999), as ondas estacionárias aumentam o nível de pressão sonora em algumas localizações do ambiente e diminuem ou anulam em

outras, o que favorece a distribuição não uniforme do som na sala, acarretando em prejuízos para a compreensão da fala em determinados locais do ambiente.

Numa sala retangular, as ondas estacionárias podem gerar três modos de ressonância (modos de salas): axial, tangencial e oblíquo (Figura 10). No modo axial, somente duas superfícies paralelas são envolvidas na propagação da onda, ou seja, as ondas se movem paralelas a um dos eixos X, Y ou Z. O modo tangencial é caracterizado pela propagação de ondas que refletem em três ou mais paredes formando um plano. No modo oblíquo, todas as seis superfícies da sala são envolvidas na propagação da onda, que se movem nas três direções dos eixos (X, Y e Z).

Figura 10 - Modos de sala: axial, tangencial e oblíquo.



Fonte: Adaptado de Everest (2001, p.229).

Por meio da (Equação 5), é possível obter o número dos modos de frequências de ressonância axial, tangencial e oblíqua numa sala (BALLOU, 1991). Tais frequências devem ser calculadas até a frequência de corte (SCHRÖEDER; KUTTRUFF, 1962).

$$f = \frac{V}{2} \sqrt{\left(\frac{p}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{q}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{r}{L_z}\right)^2} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

f = Frequências de ressonância;

V = Velocidade do som no ar, em m/s, dada por: $V = 331 + 0,6t$, onde t = temperatura, em °C;

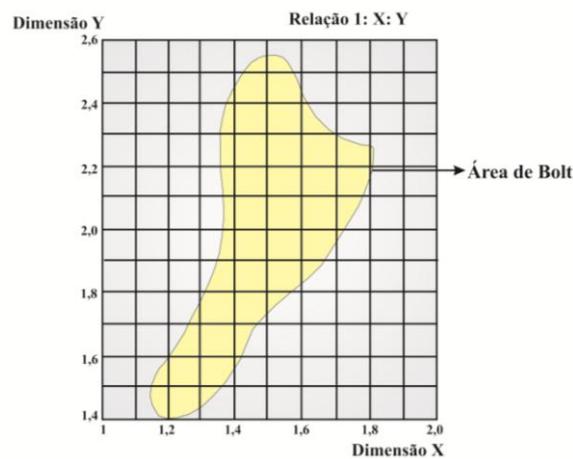
L_y, L_x, L_z = Comprimento, largura e pé-direito da sala;

p, q, r = São números inteiros.

Tendo em vista que as dimensões da sala influenciam nos modos de ressonância e na distribuição uniforme do som no ambiente, através dos cálculos modais, pode-se identificar as dimensões que possam evitar a formação de ondas estacionárias, e assim, favorecer a qualidade acústica do ambiente. Nesse sentido, baseado em trabalhos experimentais, Bolt (1946) elaborou um Diagrama, que passou a ser chamado de Diagrama de Bolt, com a proposição de relações de proporções preferenciais para dimensões de salas retangulares, levando-se em consideração a região de baixa frequência, que geralmente vai até 300Hz. Uma

vez conhecendo a relação 1 : X : Y das dimensões da sala, é possível identificar se tal proporção enquadra-se na Área de Bolt, representado no Diagrama pela cor amarela (Figura 11), que corresponde à escala considerada recomendável para garantir a distribuição uniforme dos modos de ressonância. O número 1 (um) diz respeito à altura, ou seja, ao pé-direito da sala. A dimensão X pode representar a largura do ambiente, enquanto a dimensão Y é a maior dimensão entre as três e pode representar o comprimento. Assim, para calcular as proporções da sala, basta dividir o valor da altura pela mesma, o que totaliza o número inteiro 1, enquanto os valores de X e Y são divididos pelo valor da altura.

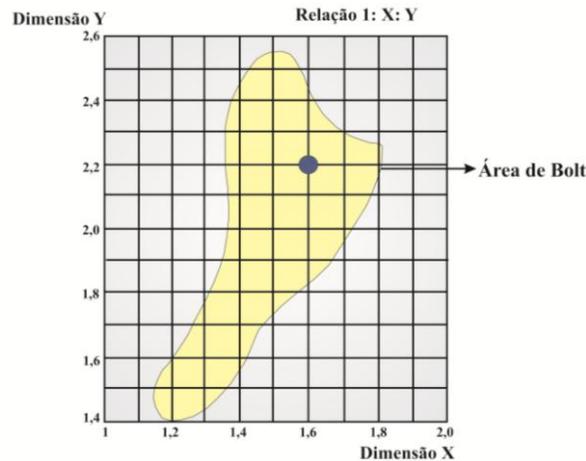
Figura 11 - Diagrama de Bolt (1946).



Fonte: Adaptado de Everest (2001, p. 248).

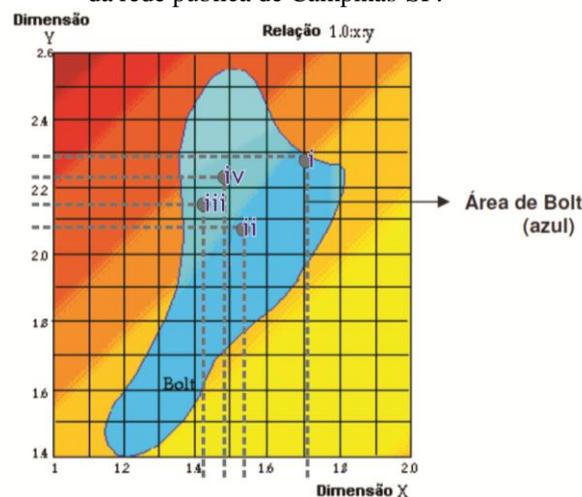
Como exemplo da verificação da proporção das dimensões de uma sala, admitindo-se uma sala com pé-direito de 3,10m, largura de 5m e comprimento de 7m, a relação resultante seria de 1 : 1,6 : 2,2, pois a dimensão do pé-direito (3,10m) é dividido pelo mesmo valor, o que totaliza no número 1; enquanto a largura (5m), que representa a dimensão X, é dividida pelo valor do pé-direito, o que resulta em 1,6; e por fim, o comprimento (7m), que representa a dimensão Y, é dividido pelo valor do pé-direito, resultando em 2,2. A relação de proporção de dimensões da sala em questão é considerada favorável, o que indica que as dimensões do ambiente encontram-se na Área de Bolt, conforme representado no Diagrama de Bolt (1946), na Figura 12.

Figura 12 – Exemplo de locação das proporções das dimensões de uma sala de aula de acordo no Diagrama de Bolt (1946).



Amorim (2007) analisou as dimensões das salas de aula da rede pública de Campinas-SP, de acordo com o Diagrama de Bolt (1946), a fim de complementar o estudo acerca da qualidade acústica dos ambientes de ensino considerados no trabalho. Dentre as 17 salas de aula avaliadas, somente quatro salas enquadraram-se na Área de Bolt: (i) sala com dimensões de pé-direito, largura e comprimento de 3,50x6x8m; (ii) sala de 3,90x6x8m; (iii) sala de 3,65x5x8m e (iv) sala de 3,5x5x8, conforme mostra a Figura 13. Foi observado que para garantir que as salas de aula atendessem à Área de Bolt, bastava que a sala 6x8m apresentasse pé-direito de no mínimo, 3,5m, enquanto as salas de dimensões 5x8m, o pé-direito mínimo deve ser de 3,4m para atender à escala de proporção recomendada por Bolt (1946).

Figura 13 - Locação das proporções das dimensões das salas de aula no Diagrama de Bolt (1946) de salas de aula da rede pública de Campinas-SP.



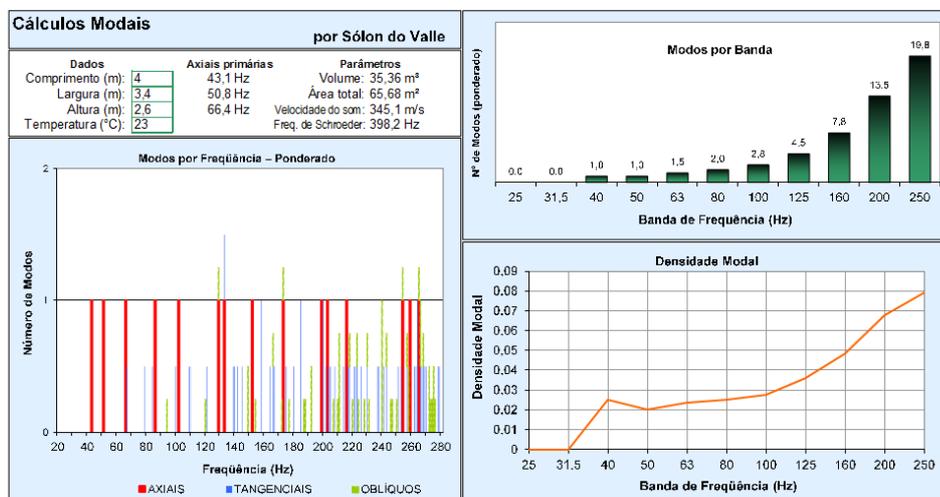
Fonte: Adaptado de Amorim (2007).

Uma vez calculadas as frequências de ressonância da sala, critérios para avaliar a distribuição dos modos de sala podem ser considerados na avaliação acústica de salas. Nesse

sentido, foram desenvolvidos por Bonello (1981) critérios que podem ser utilizados para verificação do número de modos por banda de frequência. É recomendável que o número de modos aumente com a frequência, além disso, indica-se que não haja modos coincidentes. A partir da elaboração do gráfico que apresenta a distribuição do número de modos por banda de frequência, é possível observar a evolução da curva. Se a curva ascender de forma regular, sem picos, há o indício de que as frequências modais estão distribuídas adequadamente.

Como forma de exemplificar os critérios de Bonello (1981), é apresentada a seguir uma sala cujas dimensões foram inseridas na *Planilha Modos 6.0* (2013)⁴ (Figura 14). Elaborada por Sólón do Valle (2009), a *Planilha Modos 6.0* (2013) pode ser utilizada para verificação da distribuição e o número dos modos de sala por banda de frequência. A sala de dimensões 2,6m (pé-direito), 3,4m (largura) e 4m (comprimento) apresenta distribuição adequada das frequências modais, pois há uma distribuição ascendente do número de modos por banda de frequência e com o aumento da frequência, observa-se o aumento do número de modos.

Figura 14 - Cálculos modais de uma sala.



Fonte: Adaptado da *Planilha Modos* (2013).

1.2.3 Inteligibilidade da Fala

A inteligibilidade da fala consiste na capacidade de reconhecimento da palavra falada em um determinado ambiente. Pode-se afirmar que um som é inteligível na medida em que há a compreensão de seu significado na comunicação.

⁴ A planilha *Modos 6.0* pode ser obtida através do endereço eletrônico: <http://musitec.com.br/downloads/>

Entre os fatores que influenciam o nível de inteligibilidade da fala numa sala de aula, pode-se citar: o sinal da fala, diretividade da fonte sonora, nível de ruído de fundo, tempo de reverberação e a forma da sala.

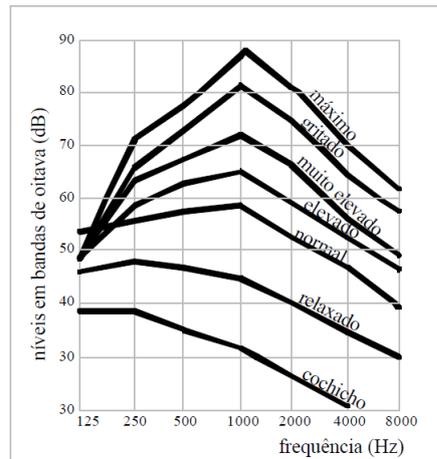
A fala é composta por ondas sonoras complexas, que variam continuamente. O som da fala apresenta variações quanto às frequências em função do tempo, além do nível de pressão sonora (EGAN, 1988). A voz humana encontra-se numa faixa de frequência entre 50 Hz e 10 KHz. No entanto, a voz masculina tem pico na frequência de 400 Hz, aproximadamente, enquanto a voz feminina, o pico situa-se na frequência de 500 Hz. Frequências abaixo de 200 Hz e acima de 6 KHz contribuem insignificativamente para a inteligibilidade da fala (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

O som das vogais é caracterizado como componente de baixa frequência da fala e é responsável pela qualidade da distinção de uma fala individual. Aproximadamente 75% da energia sonora da fala está contida nas vogais. As consoantes são componentes de alta frequência e a energia contida nas consoantes é menor (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). De acordo com Bistafa (2006), o nível sonoro das vogais é mais elevado do que o nível sonoro das consoantes, por volta de 12 dB, em média. Além disso, a duração dos sons das vogais é maior, em torno de 90ms, enquanto as consoantes, em torno de 20ms. Embora o som das vogais apresente maiores níveis de pressão sonora e maior duração, são as consoantes que fornecem inteligibilidade da fala. Nesse sentido, pode-se afirmar que a inteligibilidade da fala é definida, principalmente, pelos sons de menor duração.

Tendo em vista que o nível sonoro das vogais é de maior duração e maior do que o nível sonoro das consoantes, em uma sala com expressiva existência de reflexões tardias, o som das vogais tende a mascarar o das consoantes, o que pode acarretar em prejuízo para a inteligibilidade das palavras (BISTAFA, 2006). Assim, a fim de favorecer as condições de inteligibilidade, é necessário reduzir significativamente as reflexões tardias em ambientes destinados à fala, pois podem também ocasionar reverberações e ecos. O principal efeito do ruído na compreensão das palavras refere-se ao mascaramento do som.

Em se tratando de níveis sonoros da fala, a Figura 15 apresenta o espectro de pressão sonora de um orador do sexo masculino, relacionando as curvas representativas de situações de esforço vocal, com as respectivas variações dos níveis de pressão sonora em frequências de bandas de oitava.

Figura 15 - Espectros típicos da voz de um orador homem para diferentes esforços vocais.



Fonte: Harris (1987) *apud* Nogueira (2002).

Os sons da fala não apresentam a mesma intensidade em todas as direções, em virtude da diretividade da fonte sonora. Além disso, essa variação também depende da frequência, de maneira que quanto maior a frequência, maior a diretividade. Na frente da fonte, ou seja, na frente da cabeça, a intensidade sonora é maior (EVEREST, 2001), como pode ser observado na Figura 16. Uma das medidas de diretividade corresponde à Taxa de Diretividade (Q). De acordo com Valle (2009), a voz humana apresenta Taxa de Diretividade (Q) de 2,5.

Figura 16 - Ângulo de cobertura da voz humana: (a) plano horizontal e (b) plano vertical.



Fonte: Everest (2001).

A inteligibilidade da fala depende principalmente da intensidade sonora comparada ao nível de ruído de fundo. O nível da fala pode ser determinado pelo nível da voz, bem como pela distância entre orador e ouvinte, uma vez que a inteligibilidade decai rapidamente com a distância.

De acordo com Seep *et al* (2000), a inteligibilidade da fala pode ser avaliada por meio de testes de articulação que utilizam uma lista de palavras, onde uma pessoa pronuncia as palavras contidas numa lista padrão, e os ouvintes escrevem as palavras que foram escutadas.

Em seguida, verifica-se o percentual de palavras escutadas corretamente, e assim, obtêm-se a medida da inteligibilidade da fala de um ambiente. Existem alguns parâmetros utilizados na quantificação do nível de inteligibilidade da fala em um ambiente, tais como o Índice de Transmissão da Fala (STI), descrito numa seção mais adiante.

1.2.4 Parâmetros de Qualidade Acústica

Conforme afirma Valle (2009), os parâmetros acústicos podem ser considerados como propriedades acústicas, que podem influenciar na personalidade sonora dos recintos e podem definir a melhor ou pior qualidade para execução ou reprodução da fala ou da música.

Os parâmetros acústicos podem ser de caráter objetivo ou subjetivo e alguns deles estão relacionados à inteligibilidade da fala. Os parâmetros subjetivos estão interligados à percepção dos indivíduos e sensibilidade no ambiente. Os parâmetros objetivos são aqueles que possuem uma definição matemática estabelecida, que levam em consideração grandezas físicas mensuráveis.

Como forma de avaliar a qualidade acústica de salas, alguns parâmetros objetivos podem ser destacados: Nível de Pressão Sonora Ambiental (NPS ou L_{eq}), Relação entre Sinal e Ruído (SNR), Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Clareza (C_{50}), Definição (D_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons). As definições de cada um dos parâmetros mencionados encontram-se a seguir.

1.2.4.1 Nível de Pressão Sonora Ambiental ou Ruído de Fundo (NPS ou L_{eq})

Segundo a NBR 10151 – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade (ABNT, 2000), o Nível de Pressão Sonora ou Ruído de Fundo caracteriza-se como o ruído presente em um determinado local que não diz respeito ao objeto de apreciação ou de medição, representado em dB. O nível de pressão sonora é um dos parâmetros mais utilizados na acústica arquitetônica, e o seu valor é obtido por meio da seguinte equação:

$$NPS = 20 \text{ Log} \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (\text{Equação 6})$$

Onde:

NPS = Nível de pressão sonora ambiental ou Ruído de Fundo, em dB;

p = Pressão sonora do som medido em Pa;

p_0 = Pressão sonora de referência igual a 2×10^{-5} Pa ou 20mPa, correspondente ao limiar da audibilidade.

O NPS de um ambiente pode ser proveniente de diversas fontes, com exceção da fonte de interesse. Em se tratando de salas de aula, refere-se a todo o ruído existente, que pode ser originado do ruído produzido no interior do ambiente, a exemplo dos aparelhos de ventilação mecânica, ou aparelhos de condicionamento artificial do ar; quanto ao ruído externo, pode ser proveniente do ruído produzido em espaços recreativos dentro da própria escola, quanto ruídos de tráfego de veículos no entorno das edificações.

Os valores dos níveis de pressão sonora de um ambiente podem ser obtidos através de medições sonoras, em diferentes pontos do ambiente, com o auxílio de equipamento específico, chamado de medidor do nível de pressão sonora. No contexto brasileiro, para realização dos procedimentos de medição, podem ser seguidas as recomendações e métodos presentes na NBR 10151 - Avaliação de ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade (ABNT, 2000).

1.2.4.2 Relação entre Sinal e Ruído (SNR)

A relação entre Sinal e Ruído (SNR), conhecida também como *Signal to Noise-Ratio*, consiste na diferença entre o sinal acústico da fonte sonora e o ruído de fundo existente no ambiente. De acordo com Seep *et al* (2000), a relação entre sinal e ruído funciona como uma comparação que possibilita estimar o quão a fala é compreensível numa sala.

A inteligibilidade da fala é maximizada pelo aumento da relação entre Sinal e Ruído (SNR), que por sua vez é obtido com a maximização do ruído da fala, e minimização do ruído de fundo do ambiente. Porém, com a elevação do ruído de fundo nas salas de aula, surge cada vez mais a necessidade de elevação do nível da voz do professor, a fim de permitir a compreensão correta das palavras.

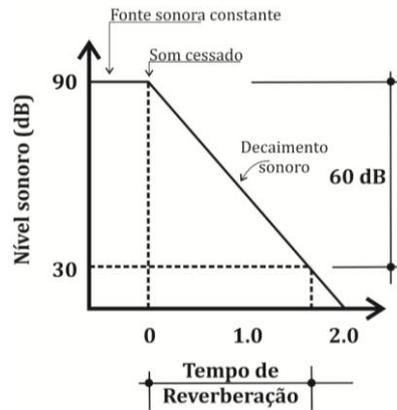
Numa sala de aula, geralmente, a SNR é menor nos fundos da sala de aula, onde o nível sonoro da voz do professor é menor, e perto da fonte sonora (voz do professor) a SNR é maior, onde o nível sonoro é máximo (SEEP *et al*, 2000).

1.2.4.3 Tempo de Reverberação (TR)

O Tempo de Reverberação (TR) ou (TR₆₀) constitui-se como um dos principais parâmetros de avaliação das condições acústicas dos ambientes. O TR trata-se do tempo necessário para que o nível de pressão sonora em um ambiente decaia os primeiros 60 dB após a interrupção do sinal sonoro (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999). A Figura 17 ilustra o TR, com a representação do nível sonoro em função do tempo, de maneira que

durante a emissão da fonte sonora no ambiente, o nível sonoro mantém-se constante, enquanto após a interrupção do sinal sonoro, ocorre o decaimento sonoro.

Figura 17 - Tempo de Reverberação (TR).



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.212).

O parâmetro TR depende do volume do ambiente, de sua ocupação (mobiliário, pessoas), superfícies dos materiais componentes das superfícies internas do ambiente, além dos seus respectivos coeficientes de absorção (α) para as faixas de frequências consideradas. Pode ser calculado através da Equação de Sabine (1922):

$$TR = \frac{0,161 \cdot V}{\sum S\alpha} \text{ (s)} \quad \text{(Equação 7)}$$

Onde:

TR = Tempo de Reverberação do ambiente avaliado, em segundos;

V = Volume do ambiente, em m^3 ;

S = Área das superfícies, em m^2 ;

α = Coeficiente de absorção dos materiais.

A Equação de Sabine (1922) é amplamente utilizada, sendo muito útil para ambientes reverberantes com formas regulares. No entanto, tal equação apresenta algumas limitações quanto a sua aplicação, pois tende a resultar em valores de TR mais elevados, comparando-se a outras formulações.

Segundo Mehta, Johnson e Rocafort (1999), ambientes que apresentam grande quantidade de superfícies absorvedoras, com materiais de elevados valores de coeficientes de absorção (α), resultam em valores de TR pequenos, ao utilizar a equação de Sabine (1922). Além disso, em uma câmara anecóica, onde o coeficiente de absorção sonora possui valor unitário, o resultado de TR seria igual a zero, visto que o campo difuso não ocorre nessas

situações. Nesses casos, os valores de TR podem ser distorcidos, uma vez que a equação é baseada nas condições de campo difuso.

Com o intuito de obter resultados mais precisos, foram desenvolvidas outras equações derivadas da Equação de Sabine (1922), tais como a Equação de Eyring (1930) e a Equação de Millington-Sette (MILLINGTON, 1932; SETTE, 1933).

A Equação de Eyring (1930) apresenta resultados mais aproximados dos valores reais do Tempo de Reverberação em ambientes menos reverberantes, com valores elevados de coeficientes de absorção (α). A Equação de Eyring (1930) consiste na seguinte expressão:

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{-S \ln(1 - \bar{\alpha})} \text{ (s)} \quad \text{(Equação 8)}$$

Onde:

TR = Tempo de Reverberação do ambiente avaliado, em segundos;

V = Volume do ambiente, em m^3 ;

S = Área das superfícies, em m^2 ;

\ln = Logaritmo neperiano da expressão $(1 - \alpha)$;

$\bar{\alpha}$ = Média dos coeficientes de absorção dos materiais.

A NBR 12170 - Tratamento acústico em recintos fechados (ABNT, 1992) indica a Equação de Sabine (1922) e a Equação de Eyring (1930) para cálculo do TR. A norma em questão sugere que seja utilizada a Equação de Eyring (1930) em salas com coeficiente médio de absorção sonora (α) maior que 0,3.

O cálculo do Tempo de Reverberação por meio da Equação de Millington-Sette (MILLINGTON, 1932; SETTE, 1933) aplica-se a ambientes que apresentam diferentes materiais internos com variados coeficientes de absorção, dado por:

$$TR = \frac{0,16 \cdot V}{[\sum_i - S_i \ln(1 - \alpha_i)]} \text{ (s)} \quad \text{(Equação 9)}$$

Onde:

TR = Tempo de Reverberação do ambiente avaliado, em segundos;

V = Volume do ambiente, em m^3 ;

S_i = Área da superfície de cada material do ambiente, em m^2 ;

\ln = Logaritmo neperiano da expressão $(1 - \alpha_i)$;

α_i = Coeficiente de absorção de cada material.

Segundo Gerges (2000), a Equação de Eyring (1930) e a Equação de Millington-Sette (MILLINGTON, 1932; SETTE, 1933) são utilizadas para ambientes com coeficiente de absorção médio (α) maior que 0,2.

1.2.4.4 Tempo de Decaimento Inicial (EDT)

O Tempo de Decaimento Inicial (EDT), *Early Decay Time*, consiste no tempo, em segundos, necessário para que a energia sonora decaia os primeiros 10 dB. O EDT é obtido da mesma maneira que o Tempo de Reverberação (TR), no entanto, a fim de comparar o EDT com o TR, é necessário multiplicar o valor de EDT por 6 (KUTTRUFF, 1979).

Segundo Bradley (2011), o EDT pode ser utilizado na avaliação das diferenças de percepção entre diferentes posições em uma sala, devendo apenas atentar que muito próximo da fonte sonora, há um decréscimo abrupto da energia sonora inicial que antecede o decaimento mais gradual.

De acordo com a norma ISO 3382 - *Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters* (ISO, 1997), o EDT é subjetivamente mais importante que o Tempo de Reverberação (TR), pois enquanto o TR está associado às propriedades físicas do ambiente, o EDT está relacionado com a percepção da reverberação.

De acordo com Mehta, Johnson e Rocafort (1999), em ambientes projetados para a fala, tais como as salas de aula, o EDT deve ser de até 50ms.

1.2.4.5 Clareza (C_{50})

O parâmetro Clareza (C_{50}) é indicado para medir a definição em que os sons são percebidos numa sala, expressa em dB. Consiste na razão logarítmica entre a energia sonora das primeiras reflexões (*early sound*), recebida entre o instante 0 (zero) e t, e a energia final, ou seja, a energia reverberante após o instante t (CAVANAUGH; WILKES, 1999). É obtida por meio da seguinte equação:

$$Ct = 10 \log \frac{\int_0^t p^2(t) dt}{\int_t^\infty p^2(t) dt} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

Ct = Clareza: C_{50} ou C_{80} , em dB;

t = Tempo inicial da chegada do som (*early sound*);

p (t) = pressão sonora medida num ponto da sala, obtida através da resposta impulsiva⁵.

Em ambientes destinados à fala, o intervalo das primeiras reflexões corresponde entre 0 (zero) a 50ms, portanto, a Clareza é denominada de C_{50} . Enquanto em salas destinadas à música, o intervalo corresponde entre 0 (zero) a 80ms, por essa razão chamado de C_{80} . A Clareza (C_{50}) é expressa:

⁵ Resposta impulsiva é obtida a partir do momento em que a sala é sonorizada com um sinal sonoro impulsivo para registro de pressão sonora em determinado ponto do ambiente.

$$C_{50} = 10 \log \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_{50 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde:

C_{50} = Clareza, em dB;

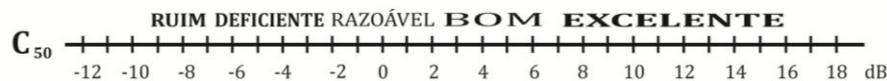
t = Tempo inicial da chegada do som (*early sound*);

$p(t)$ = pressão sonora medida num ponto da sala, obtida através da resposta impulsiva.

Numa sala de aula, quanto maior a energia contida nos primeiros 50ms, maior clareza sonora os receptores terão. A situação em que a energia sonora reverberante é maior, a clareza é prejudicada. Portanto, a energia sonora inicial deve ser maior do que a energia reverberante, de modo que os valores de C_{50} devem ser positivos para favorecer a inteligibilidade da palavra.

Marshall (1994) propõe uma classificação entre excelente, bom, razoável, deficiente e ruim, de acordo com alguns intervalos de valores do parâmetro Clareza (C_{50}), conforme pode ser observado na Figura 18. Valores de C_{50} acima de 2 dB podem ser considerados como bons.

Figura 18 - Valores de C_{50} e respectivas classificações.



Fonte: Adaptado de Marshall (1994).

1.2.4.6 Definição (D_{50})

A Definição (D_{50}) corresponde à razão entre a energia sonora das primeiras reflexões, dos primeiros 50ms, e a energia de todo o decaimento sonoro no ambiente. Ao considerar que as reflexões sonoras com o tempo de decaimento de até 50ms são úteis para a compreensão da fala, Thiele (1953) propôs a seguinte relação para cálculo do D_{50} :

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50 \text{ ms}} p^2(t) dt}{\int_0^{\infty} p^2(t) dt} \times 100\% \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

D_{50} = Definição;

t = Tempo inicial da chegada do som (*early sound*);

$p(t)$ = pressão sonora medida num ponto da sala, obtida através da resposta impulsiva.

O valor de D_{50} pode variar entre 0 (zero) a 1 (um). Valores mais próximos de 1 (um) correspondem a melhores situações de inteligibilidade, conforme indica a norma ISO 3382 -

Measurement of the Reverberation Time of Rooms with Reference to other Acoustical Parameters (ISO, 1997). Os valores de D_{50} dependem da posição do ouvinte em relação à fonte sonora, diminuindo com o aumento da distância.

1.2.4.7 Índice de Transmissão da Fala (STI)

O Índice de Transmissão da Fala (STI), *Speech Transmission Index*, trata-se de um dos parâmetros mais utilizados na avaliação da qualidade acústica de salas nas quais a compreensão das palavras é imprescindível.

Formulado por Houtgast, Steeneken e Plomp (1980), o parâmetro STI considera a interferência do ruído de fundo e a reverberação no cálculo, uma vez que tais aspectos podem prejudicar a inteligibilidade da fala.

Os valores de STI podem variar entre 0 (zero), que representa inteligibilidade nula e 1 (um), que corresponde à inteligibilidade excelente. De acordo com a norma IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011), a classificação do STI é a seguinte:

Tabela 1 - Valores de STI e respectivas classificações

Intervalo de valores de STI	Classificação
0.75 - 1	Excelente
0.6 - 0.75	Bom
0.45 - 0.6	Razoável
0.3 - 0.45	Ruim
0 - 0.3	Inaceitável

Fonte: Adaptado de IEC 60268-16 (2011)

1.2.4.8 Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

A Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), *Percentage Articulation Loss of Consonants*, como o próprio nome diz, destina-se à quantificação da porcentagem da perda na articulação, que é baseada na percepção das palavras pelos ouvintes.

Proposto por Peutz (1971), o presente parâmetro leva em consideração as características acústicas da fonte sonora e da sala, do volume do ambiente (V) e do Tempo de Reverberação (TR), obtido por meio da seguinte equação:

$$\%ALCons = \frac{200 \cdot D^2 \cdot TR^2}{V \cdot Q} \% ; \quad se D \leq DL \quad (\text{Equação 13})$$

Onde:

$\%ALCons$ = Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes, dada em %;

D = Distância entre a fonte sonora e o receptor;

DL = Distância limite, dada por: $D_L \approx 3,16 D_C$ (Distância Crítica);

V = Volume do ambiente;

Q = Diretividade da fonte sonora.

Os valores de $\%ALCons$ variam entre 0 (zero), que corresponde à excelente inteligibilidade da fala e 100 (cem), que representa inteligibilidade nula. Portanto, quanto maior a porcentagem, menor será a inteligibilidade. Os valores do parâmetro em questão variam de acordo com a posição do ouvinte na sala, pois quanto mais próximo da fonte sonora, valores de $\%ALCons$ são mais baixos, e assim, maior a inteligibilidade da fala.

A inteligibilidade da fala de acordo com os valores da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes ($\%ALCons$), pode ser classificada conforme as seguintes denominações:

Tabela 2 - Valores de $\%ALCons$ e respectivas classificações

Intervalo de valores de $\%ALCons$	Classificação
0 - 3	Excelente
3 - 7	Bom
15 - 7	Razoável
33 - 15	Ruim
100 - 33	Inaceitável

Fonte: IEC 60268-16 (2011)

1.2.5 Simulação Computacional Acústica de Salas

No âmbito do estudo da acústica de salas, a simulação computacional trata-se de uma ferramenta utilizada para estimar o comportamento sonoro de ambientes, envolvendo a modelagem da geração, propagação e recepção do som a partir de métodos numéricos, para determinação aproximada ou exata de problemas modelados matematicamente. É possível simular o emprego de uma diversidade de materiais internos, bem como, por exemplo, modificar as dimensões do ambiente e observar as implicações nos resultados dos parâmetros acústicos.

Em função da significativa aplicação prática, a simulação numérica em acústica de salas tem despertado o interesse de diversos pesquisadores, com o emprego de diferenciados métodos de simulação. Entre os métodos mais consagrados utilizados nos programas de simulação, destacam-se o de traçado de raios e o da fonte imagem, ambos baseados na acústica geométrica; além do traçado de cones ou de pirâmides (FARINA, 1995) e o de transição de energia (KRUZINS; FRICKE, 1982).

1.2.5.1 Acústica Geométrica

Atualmente, a acústica geométrica consiste na teoria mais utilizada na simulação computacional acústica de ambientes fechados. Conforme aponta Kuttruff (1979), a acústica geométrica de salas é baseada na teoria dos raios, ou seja, no conceito de raio sonoro, análogo ao conceito de raio de luz, e não de onda sonora. A reflexão é o fenômeno mais importante para a teoria dos raios.

De acordo com Ballou (1991), a teoria dos raios aplica-se ao estudo do comportamento sonoro nos ambientes nas médias e altas frequências, onde o comprimento de onda é menor do que as dimensões da sala. Sendo assim, nas baixas frequências, a acústica geométrica não é satisfatória, visto que as dimensões do ambiente são menores do que o comprimento de onda. Numa sala, a partir da frequência de corte (SCHRÖEDER; KUTTRUFF, 1962), há o predomínio das reflexões difusas, de modo que a acústica geométrica apresenta boa aplicabilidade, conforme discutido na seção *1.2.2 Teorias Acústicas no Estudo do Comportamento Sonoro de Salas*.

Entretanto, a acústica geométrica apresenta como uma das limitações, o fato de negligenciar o fenômeno da difração, visto que a propagação sonora dá-se em linha reta, sem sofrer desvio de direção (KUTTRUFF, 1979).

Diversos programas computacionais baseados na teoria em questão são disponíveis comercialmente, tais como o Raynoise (LMS INTERNATIONAL, 1998), Odeon (CHRISTENSEN, 2009) e Ease (ACOUSTIC DESIGN AHNERT, 2013-b).

Os dois principais métodos de modelagem acústica derivados da teoria dos raios, ou seja, da acústica geométrica são o Método da Fonte Imagem e o Método do Traçado de Raios, descritos a seguir.

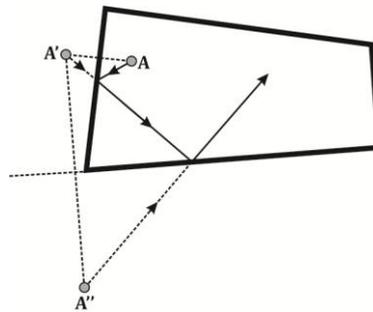
a) Método da Fonte Imagem

O Método da Fonte Imagem (MISM), *Mirror Image Source Method*, é baseado no princípio de que o fenômeno da reflexão especular pode ser estimado geometricamente a partir do espelhamento de fontes sonoras virtuais, a fim de traçar os percursos da reflexão da fonte sonora ao receptor.

O método em questão possui como princípio básico que o percurso realizado por um raio sonoro e suas inúmeras reflexões pode ser substituído por uma linha reta que une a fonte sonora virtual ao receptor. As primeiras imagens formadas são classificadas como fontes imagens de primeira ordem, enquanto as demais imagens formadas pela reflexão das fontes

imagens de primeira ordem são denominadas de fontes imagens de segunda ordem, e assim por diante. A Figura 19 ilustra a trajetória de raios sonoros em um ambiente e suas reflexões a partir da formação de imagens, de modo que A' representa a trajetória da primeira reflexão, enquanto A'' consiste na trajetória da segunda reflexão.

Figura 19 - Fontes imagens de primeira e segunda ordem.



Fonte: Adaptado de Kuttruff (1979, p.82).

O algoritmo da fonte imagem apresenta como uma das vantagens, boa resolução temporal, porém, há a desconsideração dos efeitos de difusão, ou o espalhamento, em função das formas irregulares das superfícies (GERGES, 2000).

b) Método do Traçado de Raios

O Método do Traçado de Raios (RTM), *Ray Tracing Method*, admite que os raios emitidos a partir da fonte sonora se deslocam na velocidade do som e incidem nos obstáculos no ambiente, tais como as superfícies das paredes, piso e teto, segundo a Lei da Reflexão Especular. Tal método considera que a energia sonora emitida pela fonte é distribuída por um determinado número de raios, de modo que o nível de energia de cada raio decai a cada reflexão, dependendo da absorção sonora das superfícies e da absorção sonora do ar.

Segundo Gerges (2000), a utilização do Método do Traçado de Raios demanda um tempo de simulação que é apenas proporcional ao comprimento da resposta impulsiva do ambiente. Tal aspecto favorece a manipulação dos modelos computacionais, ao obter os resultados das simulações computacionais de maneira rápida, além disso, pode considerar as reflexões difusas.

1.3 QUALIDADE ACÚSTICA DE SALAS DE AULA

Alguns estudos apontam os efeitos negativos acarretados pela inadequação acústica dos ambientes. Karabiber e Vallet (2003) mencionam alguns desses efeitos: decréscimo da atenção e fadiga mental, diminuição da inteligibilidade do conteúdo das aulas, fadiga vocal entre os professores, atraso na aprendizagem da leitura, entre outros.

Hodgson e Nosal (2002), ressaltam que embora as condições acústicas das salas de aula interfiram no processo de aprendizagem, tais aspectos são constantemente desconsiderados no processo de concepção arquitetônica. Os aspectos e princípios acústicos não são levados em consideração durante as fases iniciais da concepção projetual, devido à ideia errônea de que tal aspecto é fruto apenas da definição dos materiais de acabamento. Os recursos financeiros empregados na melhoria dos ambientes educacionais, em geral, são considerados como gastos, e não como investimentos que promovem o desenvolvimento da educação. Como consequência da falta de preocupação com a qualidade acústica de salas de aula desde as fases de concepção projetual, assim, surgem as tentativas de adequações, com o intuito de corrigir falhas no tocante à qualidade acústica.

Tendo em vista a influência das condições acústicas do ambiente no conforto de seus usuários, observa-se a existência de recomendações e diretrizes, presentes tanto em normas, como apontadas em pesquisas, que visam a qualidade acústica das salas de aula a serem consideradas na adequação e proposição de ambientes destinados à palavra falada.

1.3.1 Recomendações para Qualidade Acústica de Salas de Aula

No âmbito das referências normativas específicas da acústica de salas de aula, em 2002, foi criada a primeira norma específica para acústica de escolas, a ANSI S12.60: Critérios de desempenho acústico, requisitos de desenho e orientações para escolas (*Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools*) (ANSI, 2002), desenvolvida pela *The Acoustical Society of America - ASA* e aprovada pelo Instituto Americano de Normas (*American National Standards Institute - ANSI*) (U.S. ACCESS BOARD, 2003a,b). A fim de obter níveis de inteligibilidade satisfatórios nos ambientes de ensino, a norma em questão define por exemplo, limites aceitáveis de ruído de fundo nas salas de aula e Tempos de Reverberação apropriados.

Segundo Amorim (2007), há um consenso entre os pesquisadores que o ruído de fundo ou ruído ambiental consiste no parâmetro que mais interfere na inadequação acústica das salas de aula, em função do incômodo gerado aos seus usuários. Quanto aos níveis de ruído, a

norma ANSI S12.60 (2002) e a Organização Mundial da Saúde - WHO (2003) estabeleceram limites de níveis de ruído de fundo nas salas de aula de até 35 dB(A). A NBR 10152 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico (ABNT,1987) define como valores máximos o intervalo entre 40 a 50 dB(A).

Bradley (2002) aponta que o valor recomendável da Relação entre Sinal e Ruído (SNR) para salas de aula deve ser de no mínimo 15 dB. O Instituto Americano de Normas (ANSI, 2002) também recomenda para salas de aula SNR mínimo de 15 dB.

Em função do conflito entre a necessidade da ventilação natural em determinadas edificações e da garantia de níveis de ruído interno aceitáveis, Field e Digerness (2008), reforçam a importância em estabelecer critérios relativos aos limites de ruído para edificações que utilizam a ventilação natural, tendo em vista a inexistência de referências normativas. Os referidos autores propõem que o nível de ruído de fundo aceitável para edificações naturalmente ventiladas pode ser maior do que para edificações artificialmente climatizadas, ou seja, fechadas, de modo que tal proposta pode direcionar a práticas menos rigorosas de medidas de mitigação do ruído, visto os benefícios alcançados através da ventilação natural. Esses benefícios, considerados "não acústicos", estão relacionados com o conforto térmico, pois se os usuários sabem que a ventilação natural penetra no ambiente por meio das janelas, há a tendência em tolerar níveis mais elevados de ruído. Nesse sentido, alguns trabalhos sugerem níveis de ruído de fundo mais elevados dos que os sugeridos por normas, a exemplo de Wackernagel *et al* (1999), com valor limite de 65 dB(A), para ambientes de escritório, que possivelmente pode ter aplicação para salas de aula, pelo fato de serem ambientes de permanência prolongada e de nível semelhante de concentração dos usuários para desempenho das atividades.

Segundo a norma dos Estados Unidos, a ANSI S12.60: *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools* (ANSI, 2002), o Tempo de Reverberação (TR) máximo recomendável consiste em 0,6s para salas de aula com volume de até 283m³, considerando as frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, para ambiente desocupado, conforme pode-se observar na Tabela 3. Por meio da síntese apresentada por Karabiber e Vallet (2003), algumas recomendações relativas aos TR para salas de aula em alguns países do mundo estabelecem valores diferenciados em função, principalmente, do volume do ambiente.

Tabela 3 - Valores recomendáveis do Tempo de Reverberação (TR)

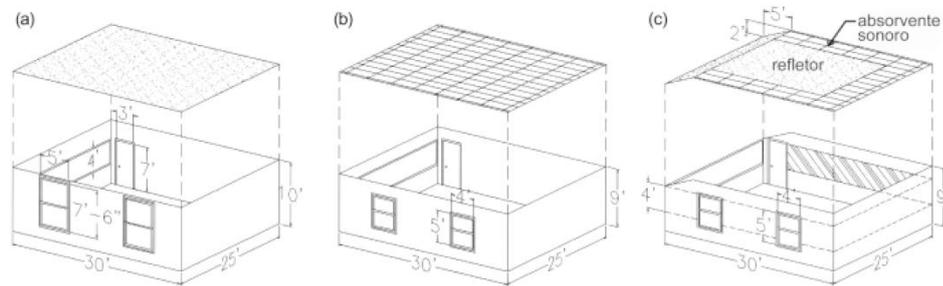
PAÍSES	TEMPO DE REVERBERAÇÃO (s)
Bélgica	$V = 100 \text{ m}^3 \Rightarrow 0.9\text{s} < \text{RT} < 1.3\text{s}$; $V = 1000 \text{ m}^3 \Rightarrow 1.1\text{s} < \text{RT} < 1.5\text{s}$
França	$V \leq 250 \text{ m}^3 \Rightarrow 0.4\text{s} < \text{RT} < 0.8\text{s}$; $V > 250 \text{ m}^3 \Rightarrow 0.6\text{s} < \text{RT} < 1.2\text{s}$ (para 500, 1000 e 2000 Hz)
Japão	$0.5\text{s} < \text{RT} < 0.7\text{s}$ (limite médio)
Portugal	$125 \leq f \leq 250 \Rightarrow \text{RT} = 1\text{s}$; $500 \leq f \leq 4000 \Rightarrow 0.6 \leq \text{RT} \leq 0.8\text{s}$
Suíça	0.6s-1.0s <i>Norme SIA 181/11 and Direc. Rec. Const. Scol. C.Vaud, 0.5s-0.7s Office Fed. Quest. Conj.</i>
Reino Unido	$72 \text{ m}^3 < V < 210 \text{ m}^3 \Rightarrow 0.4\text{s} < \text{RT} < 0.8\text{s}$
Estados Unidos	$V < 283 \text{ m}^3 \Rightarrow \text{RT} = 0.6\text{s}$; $283 \text{ m}^3 < V < 566 \text{ m}^3 \Rightarrow \text{RT} = 0.7\text{s}$ (para 500, 1000 e 2000 Hz)

Fonte: Karabiber e Vallet (2003)

No contexto do Brasil, observa-se a inexistência de normas relacionadas ao Tempo de Reverberação recomendável para salas de aula, porém, a NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados (1992) sugere valores de TR em função do volume do ambiente para recintos de diversos usos. Por exemplo, em se tratando de ambientes destinados à palavra falada, como as salas de conferência, a norma em questão aponta TR ótimo por volta de 0,6s (frequência de 500Hz), para recintos com volume em torno de 200m³.

Seep *et al* (2000) apontam como alternativas para redução do Tempo de Reverberação (TR) das salas de aula, diminuição do volume do ambiente e/ou aumento da quantidade de absorção sonora. A adoção de placas suspensas no teto composta por material absorvedor sonoro pode favorecer a diminuição do volume do recinto. Além disso, materiais absorvedores distribuídos pela sala são mais eficientes do que concentrados no piso, teto ou paredes. Em casos onde há a necessidade de aumentar a reflexão sonora em determinadas áreas da sala, a exemplo do fundo do ambiente, pode ser utilizada uma placa de gesso refletora sonora, disposta no teto, na parte frontal do recinto, ou apenas empregar materiais refletores e rígidos na região central do teto. Tendo em vista tais recomendações, Seep *et al* (2000) compararam três tipos de salas de aula de acordo com a composição das superfícies internas (Figura 20). A primeira sala de aula (a) é considerada a típica sala indesejável, com superfícies rígidas, de baixa absorção sonora; a sala de aula (b), composta de material absorvedor sonoro nas superfícies do teto e do piso, apresenta melhor comportamento acústico, se comparada à sala anterior; a terceira sala de aula (c), considerada como ideal, com material absorvedor em três paredes, teto composto de material refletor na porção central, circundado de superfícies absorvedoras e porção frontal inclinada (chanfrado).

Figura 20 - Salas de aula de diferentes composição de materiais internos: (a) típica sala de aula indesejável, com superfícies rígidas; (b) sala de aula com teto e piso revestidos com material absorvedor sonoro e (c) sala de aula considerada ideal, com material absorvedor e refletor em determinadas partes.



Fonte: Seep *et al* (2000, p.12).

No que diz respeito às recomendações existentes para adequação acústica das edificações escolares no Brasil, observa-se a existência de alguns subsídios técnicos utilizados na elaboração e execução dos ambientes educacionais públicos, como os Cadernos Técnicos: Subsídios para a Elaboração de Projetos e Adequação de Edificações Escolares, vols. 1-4 (MEC, 2002) do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - FUNDESCOLA⁶. Na referida publicação técnica são apresentados alguns condicionantes de projeto, como alguns parâmetros ambientais para garantir condições mínimas de conforto acústico, térmico, lumínico e funcional. Como recomendação relativa à construção de novas escolas, indica-se o nível de ruído máximo externo de 40dB, enquanto para escolas existentes, o nível deve ser de 45dB. Além disso, cita que o ambiente exige cuidados arquitetônicos especiais de acústica (teto e paredes) e os fatores acústicos condicionam o tamanho e forma da sala.

1.3.2 Qualidade Acústica de Salas de Aula no Brasil

No âmbito do Brasil, diversos estudos comprovam a inadequação das condições acústicas das salas de aula, a exemplo das pesquisas de Losso (2003), Zannin e Loro (2005), Toro (2005), Zwirter (2006), Amorim (2007), Santos (2012). As salas de aula, em sua maioria, principalmente em se tratando das edificações escolares públicas, não dispõem de condições satisfatórias do ponto de vista acústico, apropriadas para o ensino e aprendizagem.

No estudo desenvolvido por Losso (2003), foi avaliada a qualidade acústica de salas de aula da rede pública em Florianópolis-SC, a partir da análise das tipologias construtivas, realização de medições dos parâmetros acústicos de ruído de fundo, tempo de reverberação e

⁶ O FUNDESCOLA, instituído em 2002, atua através da parceria com a Secretaria de Educação Básica do Ministério da Educação – SEB/MEC, em conjunto com as secretarias municipais e estaduais de educação das regiões Nordeste, Norte e Centro-Oeste. Foi criado com a finalidade de promover a melhoria na qualidade das escolas públicas de ensino fundamental, bem como contribuir para o avanço na escolaridade.

tempo de decaimento inicial, além da aplicação de questionários direcionados aos usuários das escolas. Através da análise das tipologias construtivas, concluiu-se que as escolas não são projetadas considerando aspectos acústicos, com desconsideração do entorno e fontes sonoras. Além disso, a disposição em planta das edificações não favorece a proteção das salas de aula dos ruídos externos. As medições sonoras nas salas de aula constataram elevados níveis de ruído de fundo, entre 56,8 a 70,5 dB(A), para situações com portas e janelas abertas. Os resultados do tempo de reverberação e tempo de decaimento inicial encontrados também foram acima dos valores aceitáveis. Os questionários aplicados aos alunos e professores indicam a percepção que os usuários possuem acerca da situação precária das escolas. Assim, os resultados evidenciam a existência de graves problemas acústicos decorrentes de mau planejamento tipológico, bem como do emprego de materiais inadequados.

Zannin e Loro (2005) avaliaram as edificações escolares da rede estadual de ensino do Paraná que seguem um projeto padrão, com salas de aula de dimensões 7m (largura), 7,10m (comprimento) e 3,05m (pé-direito), resultando em volume de ambiente de 151,58m³ e capacidade máxima de ocupação de 40 alunos. Como forma de obtenção dos resultados dos parâmetros acústicos do TR e do ruído de fundo, foram realizadas medições, para três situações: salas desocupadas, salas com 50% de ocupação e salas com a capacidade máxima de ocupação. Embora as escolas sejam localizadas em áreas periféricas da cidade de Curitiba, as medições dos níveis de ruído encontrados foram entre 56,2 e 63,3dB(A), em se tratando dos ambientes desocupados. Nos ambientes totalmente ocupados, foram identificados níveis de ruído de fundo entre 75,2 e 80,5 dB(A). Além disso, os valores de TR das salas aula desocupadas correspondeu a 1,65s; em relação às salas de aula com metade da ocupação, TR resultante de 1,15s; e por fim, os ambientes totalmente ocupados apresentaram TR de 0,76s. Através do estudo, constatou-se a inadequação acústica das salas de aula estudadas, com alcance de valores dos parâmetros que excedem aos recomendáveis pelas normas.

Na pesquisa desenvolvida por Zwirter (2006), que teve como objeto de estudo as edificações escolares públicas de Curitiba, os resultados das medições sonoras e dos questionários aplicados aos usuários demonstraram que os ruídos que mais perturbavam a realização das atividades nas salas de aula eram provenientes da própria escola, ou seja, os ruídos produzidos nos espaços recreativos, por exemplo, em pátios, corredores e em outras salas de aula. Não foi mencionado de maneira alguma, os ruídos ocasionados pelo tráfego de veículos ou do entorno das escolas.

Ao analisar as escolas públicas de Belém-PA, Toro (2005) constatou a inadequação das condições acústicas das salas de aula, uma vez que foram obtidos resultados desfavoráveis em relação ao ruído de fundo, ao Tempo de Reverberação (TR) e à Inteligibilidade da Fala. Os resultados relativos ao ruído de fundo foram obtidos através de medições levando-se em consideração a condição de janelas fechadas, com ventilador ligado e janelas abertas, com ventilador desligado. Observou-se que na primeira condição, o maior valor encontrado foi de 70,3dB(A), enquanto na segunda condição, o maior nível de ruído correspondeu a 65,7dB(A). Por meio de cálculos, com a utilização da Equação de Sabine e da Equação de Eyring, foram calculados os Tempos de Reverberação das salas de aula, o que resultou em valores de TR entre 1,39s e 1,90s (na frequência de 500Hz), a depender do ambiente e da equação. Em relação à Inteligibilidade da Fala, foram aplicados testes de percepção da fala aos ouvintes, que foram classificados como bons; porém, em relação ao parâmetro Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), nenhuma sala atingiu o valor recomendável.

Com o intuito de analisar as condições acústicas de uma sala de aula em função das possibilidades de climatização do ar, seja natural ou artificial, Oiticica, Duarte e Silva (2003), avaliaram em uma sala de aula localizada em Maceió-AL, as seguintes situações: janelas fechadas, com ar condicionado; janelas fechadas, com ventilador em funcionamento; e janelas abertas e ventilador ligado. Verificou-se através das medições, que o nível de ruído para a situação das janelas abertas, de 68dB(A), foi ligeiramente superior ao nível de ruído para as demais situações, correspondente a 66dB(A). Quanto ao TR, os cálculos mostraram valores discretamente mais elevados em se tratando da situação com janelas fechadas (TR = 0,75s (na frequência de 512Hz)), enquanto a situação com janelas abertas, o TR resultou em 0,68s (na frequência de 512Hz), o que pode indicar que o uso das aberturas pode promover melhorias nos parâmetros acústicos.

No contexto da influência das características arquitetônicas do ambiente com os resultados nos parâmetros acústicos, vale destacar o trabalho de Amorim (2007), com o estudo dos parâmetros acústicos resultantes das diferentes formas geométricas de salas de aula padronizadas da rede pública de ensino de Campinas-SP. Para obtenção dos resultados, foram realizadas medições *in situ*, com a utilização da técnica de resposta impulsiva da sala. Os parâmetros considerados no referido trabalho foram os seguintes: Nível de Pressão Sonora (NPS), Relação entre Sinal e Ruído (SNR), Tempo de Reverberação (TR), Tempo de Decaimento Inicial (EDT), Definição (D₅₀), Índice de Transmissão da Fala (STI) e

Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons). A forma geométrica retangular, de dimensões 6m (largura) por 8m (comprimento), apresentou melhores resultados se comparado às formas quadradas, principalmente ao TR, indicando a necessidade de menor adequação acústica para sala de dimensões retangulares. Embora tenham-se identificado tendências de comportamento em relação às formas geométricas das salas, não foi possível estudar de maneira isolada a relação entre forma geométrica das salas em virtude das diferenciações arquitetônicas de cada sala de aula.

Santos (2012), avaliou as condições acústicas de 119 escolas da rede pública da cidade de João Pessoa de acordo com alguns parâmetros acústicos. Como interferência dos ruídos externos nas salas de aula, verificou-se que cerca de 75% das edificações escolares apresentaram níveis de ruído acima do valor máximo recomendável, de 50dB(A), conforme sugere a NBR 10151 – Avaliação do Ruído em Áreas Habitadas Visando o Conforto da Comunidade (ABNT, 2000). Quanto ao Tempo de Reverberação, apenas 18,33% das salas de aula apresentaram valores de TR de até 0,6s, considerados aceitáveis pela norma S12.60: *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools* (ANSI, 2002). As avaliações do Índice de Transmissão da Fala (STI) revelaram resultados muito desfavoráveis, pois 92,5% das salas de aula foram classificadas como nível péssimo de acordo com a norma IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011). Os resultados revelaram a baixa qualidade acústica das salas de aula, situações que merecem atenção especial, visto que a inteligibilidade é um fator decisivo na comunicação.

A concepção do projeto arquitetônico de escolas envolve inúmeras variáveis e procedimentos, portanto, trata-se de um projeto complexo, tendo em vista as exigências e a responsabilidade, tanto de ordem ambiental, social e econômica. Projetos desenvolvidos com o devido cuidado e atenção aos condicionantes têm maiores chances de resultar em melhores ambientes de aprendizado (KOWALTOWSKI, 2011).

1.4 ABERTURAS

A acústica de salas, conforme mencionado anteriormente, dedica-se ao estudo de ambientes fechados. No entanto, espaços abertos, com a existência de aberturas, a exemplo das janelas, são projetados, visto a necessidade da utilização da ventilação natural como estratégia para obtenção do conforto térmico, particularmente em climas quente e úmido, bem

como da necessidade em garantir condições acústicas favoráveis ao desenvolvimento das atividades nos ambientes, de acordo com o seu uso.

Os estudos realizados sobre a qualidade acústica de salas de aula em países desenvolvidos dedicam-se mais aos aspectos relacionados à acústica interna do ambiente, de modo que a interferência do ruído externo nas condições acústicas da sala não são tão relevantes, visto que em países de clima frio ou temperado, as janelas costumam permanecer fechadas, e além disso, possuem vedação contra os ruídos. Em países de clima tropical, tais como o Brasil, em virtude da necessidade da ventilação natural nas edificações escolares, com o emprego de grandes aberturas, há significativa influência do ruído externo no interior dos ambientes de ensino.

1.4.1 Importância das Aberturas para Ventilação Natural em Regiões de Clima Quente e Úmido

Em regiões de clima quente e úmido, existente em grande parte do território brasileiro, a umidade relativa do ar costuma ser elevada, e a temperatura do ar é, em geral, um pouco mais baixa que a temperatura do corpo humano. Nesse contexto, as edificações devem impedir o ganho de calor advindo da radiação solar, enquanto promovem a dissipação do calor produzido em seu interior (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008). Por isso, o resfriamento através da ventilação natural consiste na principal estratégia bioclimática para amenizar o desconforto térmico, além de promover a renovação do ar no interior das edificações.

O aproveitamento dos recursos naturais de climatização, a exemplo da ventilação natural, é colocado hoje como aspecto fundamental que pode favorecer a diminuição do uso intenso de meios artificiais para obtenção do conforto térmico, e conseqüentemente, da demanda por energia elétrica.

A busca de soluções que possam garantir adequados níveis de conforto nas salas de aula, fazendo uso de recursos naturais disponíveis para compor ambientes confortáveis estão relacionados com o conceito da arquitetura bioclimática⁷ aplicada às construções escolares, na medida em que estabelece melhores condições ambientais, levando-se em consideração a

⁷ Segundo Corbella e Yannas (2003), a *arquitetura bioclimática* busca a associação entre as variáveis climáticas, e as necessidades de conforto, aprazibilidade e salubridade aos usuários. Considera-se que o edifício tem a capacidade de funcionar como mecanismo de controle das variáveis climáticas locais. Soluções são utilizadas a fim de favorecer o conforto ambiental, que contribuem para amenizar os gastos energéticos com climatização artificial.

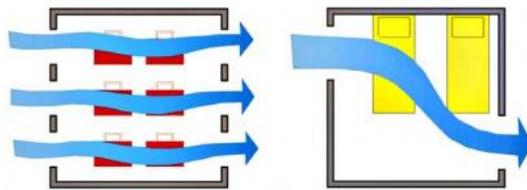
análise do contexto climático em que se insere, promovendo dessa forma, menor impacto possível ao meio ambiente e a seus usuários.

Segundo Evans (1983 *apud* Bittencourt e Cândido, 2010), a promoção do movimento do ar no interior das edificações está sujeita a algumas variáveis arquitetônicas, entre elas: tipo, dimensionamento e localização das aberturas de entrada do ar na parede.

A velocidade média interna de corrente de ar nas edificações depende da dimensão das aberturas, que por sua vez está relacionada com a porosidade⁸ das paredes, de forma que quanto maior a porosidade, maior será a velocidade do ar no interior dos recintos.

A localização exerce influência na distribuição da corrente de ar no interior da edificação. Em geral, ambientes que apresentem aberturas em diferentes fachadas, possuem maior potencial na obtenção de uma adequada ventilação. A localização das aberturas deve ser planejada de acordo com a caracterização dos ventos no local. Um exemplo do efeito da localização das aberturas no recinto é ilustrado na Figura 21, de modo que dependendo da distribuição, o escoamento do ar pode ser distribuído ou concentrado.

Figura 21 - Localização das aberturas no interior dos ambientes: escoamento de ar distribuído e concentrado.



Fonte: Bittencourt e Cândido (2010, p.53).

Quanto à forma das aberturas, Sobin (1981 *apud* Bittencourt e Cândido, 2008) investigou a influência de três formas de abertura: horizontal, quadrada e vertical em relação ao movimento de ar no interior das edificações, chegando à conclusão, que para uma mesma área de abertura, as aberturas de entrada de ar com forma horizontal apresentam maior rendimento médio para todos os ângulos de incidência do vento.

Tendo em vista as limitações econômicas na construção, manutenção e uso de edificações escolares públicas, a utilização da ventilação natural consiste na estratégia mais empregada para obtenção do conforto térmico. Nesse sentido, no Brasil, observa-se a existência de recomendações técnicas relativas aos vãos de abertura, destacados na seção seguinte.

⁸ A porosidade das edificações consiste na razão do total da área aberta dividido pela área da parede.

1.4.1.1 Recomendações em Relação aos Vãos de Abertura

Quanto às recomendações existentes no que diz respeito aos vãos de aberturas, verifica-se a ênfase principalmente no dimensionamento da abertura.

Conforme pode ser observado na Figura 22, a presente ficha técnica contida nos Cadernos Técnicos: Subsídios para a Elaboração de Projetos e Adequação de Edificações Escolares, vols. 1-4 (MEC, 2002) do FUNDESCOLA, há a recomendação da ventilação cruzada nas salas de aula, com o atendimento de no mínimo, 1/8 de abertura em relação à área de piso, ou seja, 12,5% da área de piso ou mais, em se tratando de novas escolas. Vale mencionar as recomendações relativas às aberturas para iluminação natural, pois muitas vezes, no caso das salas de aula, as aberturas se destinam tanto à entrada da ventilação natural, quanto da iluminação natural. Nesse sentido, a recomendação da área de abertura para iluminação natural deve ser de no mínimo, 1/4 da área de piso, o que corresponde a 25% (MEC, 2002).

Figura 22 - Exemplo de ficha técnica do FUNDESCOLA.

Ambiente: sala de aula		FUNDESCOLA ED - 01 / U
Localização	Urbano	
Segmento	1ª a 8ª séries	
Número de usuários	36 alunos e 1 professor	
Observações de Funcionalidade		
Local principal de desenvolvimento de aulas dos componentes curriculares do ensino fundamental, de aulas ou atividades de reforço e recuperação e de aulas de aceleração da aprendizagem. É recomendável, para criar opções de prática pedagógica, que se obtenha solução arquitetônica que possibilite diversas formas de arranjo do mobiliário, de modo a permitir organização em pequenos grupos, em círculo, fileiras e outras mais, com desembaraçada movimentação dos alunos. Os parâmetros de visibilidade e acústica condicionam o tamanho e a forma da sala.		
Condicionantes Ambientais	Parâmetros	
	Recomendados - escolas novas	Mínimo - escolas existentes
Área útil por aluno	1,32 m ² ou mais	1,15 m ²
Largura útil	7,50 m ou mais	5,10 m
Comprimento útil máximo	8,10 m	9,50 m
Vão livre portas	1,20 m com visor	0,90 m com visor
Pé-direito livre (teto plano)	3,00 m livre sob viga	2,60 m livre sob viga
Abertura para iluminação natural	1/4 da área do piso ou mais	1/5 da área do piso ou mais
Abertura para ventilação natural	1/8 da área do piso ou mais	1/10 da área do piso ou mais
Insolação	Evitar insolação direta	Evitar insolação direta
Iluminação artificial	Fluorescente/eletrônica	Fluorescente
Nível de iluminamento	500 lux	300 lux
Tempo para uma troca de ar	2 min	6 min
Nível máximo de ruído externo	40 dB	45 dB
Laje/forro	Obrigatório	Obrigatório
Ventilação cruzada	Obrigatória	Obrigatória
Paredes	Semi-impermeáveis e claras	Semi-impermeáveis e claras
Piso	Lavável e antiderrapante	Antiderrapante
Carga acidental prevista	500 kgf/m ²	300 kgf/m ²

Observações Técnicas do Ambiente

Situar as aberturas para iluminação do lado esquerdo, em relação ao quadro de giz. Evitar reflexos no quadro de giz ou de caneta (quadro branco).

Aberturas de iluminação e ventilação devem ser guarnecidas de persianas, venezianas, treliças e de vidros ou lâminas que permitam a abertura.

Impedir a entrada de radiação solar direta em qualquer orientação.

Em teto inclinado, considerar o pé-direito livre pelo ponto mais baixo, obedecendo, nesse ponto, ao parâmetro recomendado ou mínimo.

Fonte: MEC (2002).

Com a finalidade de promover a ventilação cruzada no ambiente, torna-se necessária a inserção de aberturas para entrada e a saída do fluxo de ar. Segundo recomendação do FUNDESCOLA (MEC, 2002), a fim de proporcionar a renovação do ar nas salas de aula, é necessária a utilização de aberturas de saída do ar quente na parte mais alta do ambiente, enquanto as aberturas de entrada de ar devem ser previstas em altura inferior à abertura de saída.

No caso das salas de aula da rede pública de ensino de Maceió-AL, as aberturas de entrada do fluxo de ar são dispostas, geralmente, em apenas uma parede do ambiente, enquanto as aberturas de saída de ar se tratam de rasgos⁹, ou seja, vãos permanentemente abertos, implantados na parede oposta às janelas (Figura 23).

Figura 23 - Rasgos empregados em salas de aula da rede pública municipal de ensino, em Maceió-AL.



Fonte: Silva (2011).

A recomendação quanto à ventilação cruzada estabelecida pelo FUNDESCOLA (MEC, 2002) contempla a NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005), que trata do Zoneamento Bioclimático Brasileiro. De acordo com a NBR 15220 (ABNT, 2005), a principal estratégia projetual para obtenção de conforto térmico em edificações localizadas na cidade de Maceió-AL, Zona Bioclimática 8, trata da ventilação cruzada permanente, portanto, a recomendação consiste em utilizar grandes aberturas, de no mínimo 40% de abertura em relação à área de piso.

Embora a NBR 15575 – Edifícios habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013) esteja voltada para as habitações, vale ressaltar que esta norma indica área de abertura de no mínimo 8% em relação à área de piso do ambiente, em se tratando de edificações localizadas na região nordeste do Brasil.

Segundo o Código de Urbanismo e Edificações da cidade de Maceió-AL, Lei Municipal N. 5.593, Art. 480, relativa às Exigências do Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió, de 08 de Fevereiro de 2007 (PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ, 2007), no que se refere às edificações escolares, há a exigência de que os

⁹ No presente trabalho, o termo "rasgo" foi adotado com a finalidade de diferenciar das aberturas maiores, no caso, para diferenciar das janelas.

ambientes de permanência prolongada, como as salas de aula, devem ter iluminação e ventilação natural.

Verifica-se que as informações e recomendações em relação aos vãos de aberturas, as janelas, encontram-se nas referências voltadas para o conforto térmico, conforme mencionado nas normas NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005) e NBR 15575 – Edifícios habitacionais – Desempenho (ABNT, 2013), com a recomendação de dimensionamento proporcional à área de piso do ambiente. Até mesmo as recomendações do FUNDESCOLA (MEC, 2002), ao tocar nas aberturas, há a associação direta com a iluminação e a ventilação natural, de modo que as implicações acústicas do emprego das aberturas não são abordadas.

Diante das recomendações em relação aos vãos de aberturas para ventilação natural, implicações além dos aspectos de ventilação natural e isolamento acústico necessitam de abordagens, a exemplo do efeito das aberturas do ponto de vista do comportamento sonoro dos ambientes.

1.4.2 Enfoque Acústico das Aberturas para Regiões de Clima Quente e Úmido

Em relação ao enfoque acústico, a maior parte da literatura a respeito das aberturas, concentra-se no campo do isolamento sonoro, ao considerar que tais componentes arquitetônicos interferem significativamente no isolamento de uma parede, devido à dificuldade em compatibilizar as necessidades acústicas, ao garantir níveis de ruído aceitáveis nos recintos, e as necessidades térmicas, com a obtenção da ventilação natural. No entanto, ressalta-se a carência de estudos que abordem a influência das aberturas na acústica de salas.

Embora o isolamento acústico não seja o foco do presente trabalho, torna-se necessária uma breve abordagem acerca da perda de transmissão sonora, visto que os estudos envolvem aspectos imprescindíveis na compreensão do comportamento acústico dos ambientes, como a absorção e transmissão sonora através das aberturas.

A perda de transmissão sonora (PT), *transmission loss (TL)*, consiste em uma forma de mensuração do decréscimo do isolamento acústico da parede, ocasionado pela inserção de aberturas. A perda de transmissão é a quantificação da redução da energia sonora ao atravessar o material ou elemento e está relacionado ao coeficiente de transmissão sonora (τ), na presente forma:

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (\text{Equação 14})$$

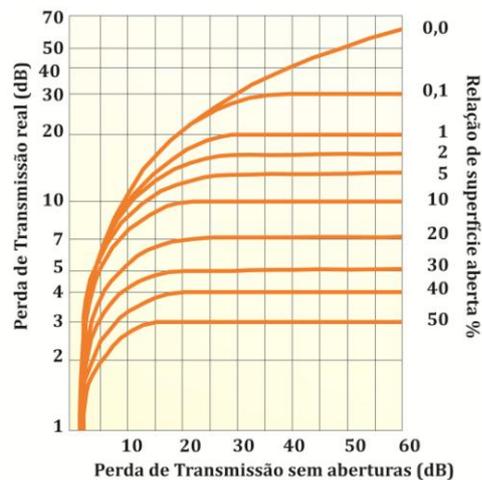
Onde:

PT = Perda de transmissão sonora, em dB;

τ = Coeficiente de transmissão sonora.

A Figura 24 ilustra a relação entre a perda de transmissão de uma parede sem aberturas e de uma parede com abertura. Observa-se que uma abertura que ocupe 1% da área de uma parede pode diminuir a propriedade de isolamento acústico de 30 dB para 20 dB, evidenciando dessa forma, a dificuldade em garantir o isolamento acústico ao utilizar as aberturas nas edificações.

Figura 24 - Perda de transmissão em um recinto em função da inserção de aberturas.



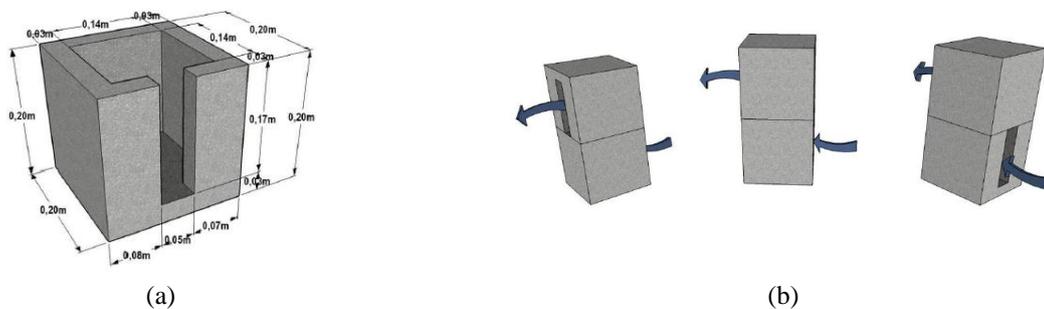
Fonte: Miller e Montone (1978) *apud* Trompette *et al* (2009).

As aberturas, as frestas e a falta de vedação das esquadrias são consideradas como fatores que interferem no decréscimo do isolamento acústico, pelo fato de permitirem a passagem do som de um meio ao outro. Mesmo uma pequena abertura pode prejudicar a eficiência acústica de um ambiente fechado (KUTTRUFF, 1979). Segundo Gerges (2000), as aberturas e frestas podem reduzir a perda de transmissão, bem como podem amplificar o ruído em algumas frequências (ressonâncias acústicas).

Com o intuito de minimizar o problema da dicotomia entre os aspectos térmicos e acústicos, vale destacar os trabalhos de Araújo (2010) e Oiticica (2010). Araújo (2010) desenvolveu um elemento vazado acústico (conhecido popularmente como cobogó), com isolamento sonoro superior ao de outros elementos encontrados no mercado, além de possibilitar a passagem da ventilação natural. Para tanto, foram desenvolvidos quatro tipos de blocos, avaliados conforme diferentes montagens numa fachada, fechados, com e sem

material absorvedor sonoro (Figura 25). Quanto às avaliações de desempenho do isolamento sonoro, foram realizadas medições *in situ*, de acordo com a Norma ISO 140-5; em relação às avaliações da ventilação natural, foram realizadas simulações computacionais, com a utilização dos métodos da dinâmica dos fluidos computacional - CFD. Foram obtidos resultados satisfatórios de isolamento sonoro, principalmente para o tipo denominado "caixa", com isolamento de 27 dB, além de apresentar relação de área aberta (cavidade) satisfatória para entrada da ventilação natural. Através da pesquisa em questão, verificou-se que é possível tratar áreas abertas, ao utilizar componentes capazes de garantir a ventilação natural e o isolamento sonoro, simultaneamente.

Figura 25 - Elemento vazado (cobogó) com isolamento sonoro, do tipo "caixa", desenvolvido por Araújo (2010). (a) croqui esquemático das dimensões do bloco; (b) croqui do elemento instalado, para ilustrar a cavidade de passagem.

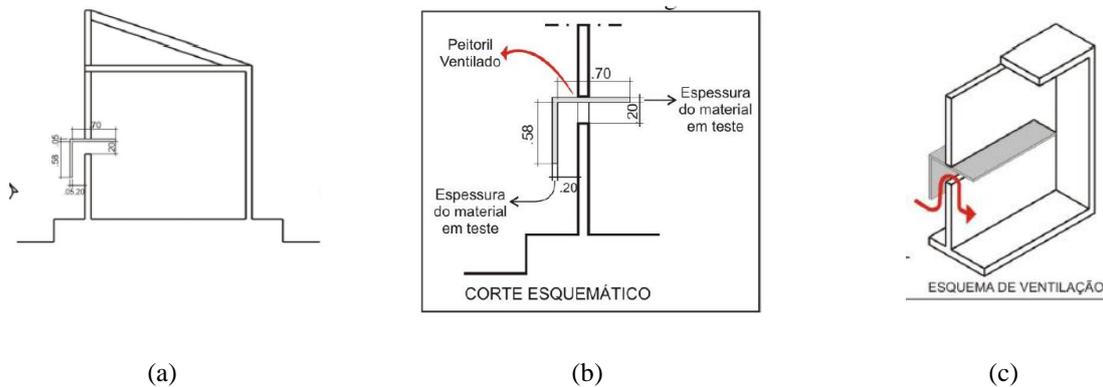


Fonte: Araújo (2010).

Oiticica (2010), em sua tese de doutorado, investigou o desempenho acústico de diversas tipologias de peitoris ventilados, com a finalidade de criar subsídios técnicos para que tais componentes sejam utilizados como dispositivos de abertura nas fachadas de edificações em regiões de clima quente e úmido, como mecanismo complementar de captação do movimento de ar proporcionado pelas janelas. O peitoril ventilado consiste em um dispositivo geralmente em formato de "L" invertido, sobreposto a uma abertura, disposto abaixo do peitoril da janela (Figura 26). Com o intuito de aprimorar a composição do peitoril ventilado, foram criados diversos protótipos, com diferentes dimensões e materiais, tais como concreto, granito, PVC, chapa cimentícia, entre outros, revestidos com materiais absorvedores. Para avaliação do desempenho acústico, as tipologias de peitoris foram inseridas em uma fachada e testadas de acordo com procedimentos de medições sonoras *in situ*, baseados em normas específicas de isolamento aéreo de fachadas, tais como a ISO 140-5:1998(E) e ISO 717-1(1996). Através da investigação, foi possível verificar as significativas alterações nos resultados do isolamento sonoro conforme a alteração dos materiais componentes dos protótipos. Ao comparar o desempenho dos diferentes peitoris, constatou-se

que os resultados mais significativos foram relativos aos dispositivos compostos de material refletor, absorvedor e perfurado, com as superfícies internas (parede do duto de ventilação) perfurado, alcançando valores entre 25dB a 26dB, semelhante ao desempenho de uma parede de alvenaria vedada, sem aberturas. Dessa forma, comprovou-se que o peitoril ventilado constitui-se como uma alternativa passiva de projeto capaz de atenuar a entrada de ruído externo à edificação e favorecer a penetração da ventilação natural, o que pode acarretar na minimização dos gastos energéticos ao estimular o uso de recursos naturais.

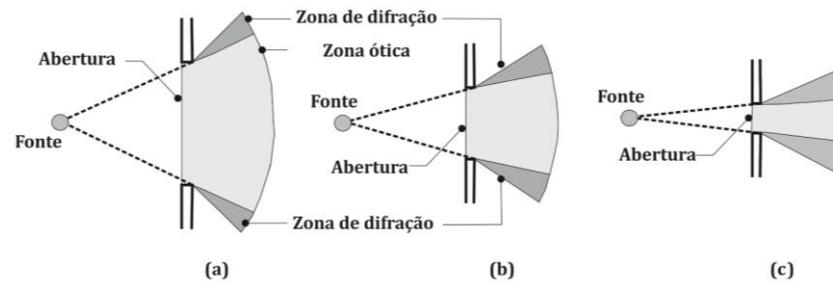
Figura 26 - Desenhos esquemáticos do peitoril ventilado. (a), (b) Cortes esquemáticos e (c) Esquema da passagem de ventilação através do duto (cavidade) do peitoril.



Fonte: Oiticica (2010).

A quantidade de som que passa através das aberturas está relacionada com a transparência visual (ótica), e conseqüentemente, com a transparência acústica. De acordo com Mehta, Johnson e Rocafort (1999), para um dado tamanho de abertura, a transparência acústica aumenta com o decaimento da frequência, pois sons de baixa frequência, ao atravessarem uma abertura não sofrem desvios de curvatura de direção, contornando mais facilmente o obstáculo. Além da frequência, outro aspecto que influencia na transparência acústica das aberturas trata-se do tamanho, ou seja, do dimensionamento. Conforme pode ser observada na Figura 27, para uma mesma frequência sonora, a passagem do ar através das três aberturas de diferentes tamanhos, possui comportamentos distintos, uma vez que, com a diminuição do tamanho da abertura, nota-se um percentual cada vez maior da passagem do som através das aberturas em função da difração.

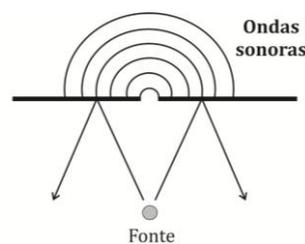
Figura 27 - Passagem do som de uma mesma frequência através de aberturas de três tamanhos diferentes.



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.43).

Em relação às pequenas aberturas, tais como da Figura 28, que apresentem dimensões muito menores do que o comprimento de onda incidente, a abertura terá comportamento similar a uma fonte sonora secundária, de maneira que passará a propagar o som em torno do obstáculo de modo hemisférico (MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999).

Figura 28 - Passagem do som através de uma pequena abertura.



Fonte: Adaptado de Mehta, Johnson e Rocafort (1999, p.43).

Do ponto de vista da absorção sonora, a maior parte da literatura (KUTTRUFF, 1979; EGAN, 1988; MEHTA; JOHNSON; ROCAFORT, 1999) considera a janela como um perfeito absorvedor acústico, visto que a parcela total do som que incide na referida abertura é transmitida para o meio externo à edificação. Assim, o coeficiente de absorção sonora (α) de abertura corresponde a 1 (um), para todas as frequências, o que equivale a 1 sabine, ou seja, 100% da energia sonora incidente neste componente é absorvida.

Alguns trabalhos indicam que a capacidade de absorção sonora das aberturas tem relação direta com as suas dimensões características e as frequências das ondas sonoras incidentes, ou seja, pode haver variação dos coeficientes de absorção de acordo com as bandas de frequências, apresentados a seguir.

Martellotta (2012) aponta que a absorção sonora através das aberturas tem sido raramente considerada na acústica de salas, verificando-se apenas a existência de estudos relacionados às pequenas aberturas (geralmente com poucos centímetros de largura), com a

abordagem da perda de transmissão (*transmission loss*) devido às aberturas (WILSON; SOROKA, 1965; SAUTER; SOROKA, 1970; SGARD; NELISSE; ATALLA, 2007), mas nada sobre grandes aberturas.

No contexto das pequenas aberturas, pode-se destacar o trabalho de Wilson e Soroka (1965), que estudaram o efeito de uma abertura circular numa parede de espessura fina, submetida à incidência de onda plana. A abordagem numérica proposta pelos autores foi posteriormente comparada com os resultados obtidos através de medições em duas câmaras reverberantes. Com a finalidade de tornar os resultados independentes das dimensões da abertura, foi utilizada a frequência normalizada ka , onde k consiste no número de onda e a é o raio da abertura, em metros. Por meio do estudo, os autores comprovaram que acima de determinado valor, dependendo da relação entre profundidade da abertura (que neste caso consiste na espessura da parede) e o raio da abertura, o total da energia sonora incidente passa através da abertura. Entretanto, abaixo dessa frequência de transição, a energia sonora transmitida através da abertura passa a ser menor. Além disso, verificou-se que em se tratando de situações as quais a abertura é menor do que a profundidade da abertura (ou seja, a espessura da parede), fortes fenômenos de ressonância foram notados.

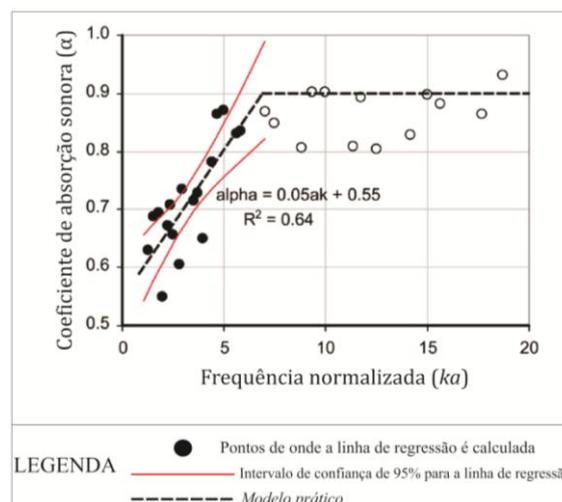
Quanto às pequenas aberturas quadradas, o estudo de Sauter e Soroka (1970) constatou a similaridade em relação ao comportamento observado em pequenas aberturas circulares. Conforme apontado nos dois estudos mencionados sobre pequenas aberturas, o aspecto determinante na absorção sonora através dessas aberturas está presente na relação entre a profundidade da abertura (portanto, a espessura da parede) e o raio da abertura (no caso das aberturas pequenas quadradas, corresponde à largura).

Sgard, Nelisse e Atalla (2007), realizaram uma extensa revisão dos modelos existentes acerca da transmissão do som através das aberturas em paredes de espessura fina e propôs um rigoroso modelo numérico baseado numa abordagem modal para predição da perda de transmissão em condições de campo difuso. Os autores verificaram que os modelos numéricos existentes de transmissão sonora através das aberturas, considerando a incidência da onda normal, forneceram resultados equivalentes aos modelos com a abordagem de campo difuso, de modo que para as altas frequências, a diferença tende a desaparecer; enquanto nas baixas frequências, a diferença nos resultados tende a aumentar, mas não são superiores a 3 dB.

A fim de preencher a lacuna a respeito da absorção sonora de grandes aberturas, Martellotta (2012) realizou medições em modelos em escala reduzida de uma câmara

reverberante, na escala de 1:20, para obtenção dos resultados de absorção equivalente considerando diferentes dimensões de aberturas. Os modelos com as distintas dimensões de aberturas foram inseridos em uma sala de comportamento similar a uma câmara anecóica, para assegurar a completa absorção do som através das aberturas, uma vez que esta se aproxima da propagação sonora no campo livre. Foram realizadas medições dos coeficientes de absorção considerando quatro configurações de aberturas, de modo que a largura da abertura se manteve igual para todos os modelos, de 6 cm (que equivale a 1,20 m na escala real), enquanto a altura da abertura correspondeu a 3, 6, 12 e 22 cm (que equivale respectivamente a 0,6 , 1,2 , 2,4 , e 4,4 m na escala real). Em seguida, os resultados dos coeficientes de absorção foram comparados com os valores teóricos derivados de estudos sobre a perda de transmissão (*transmission loss*), de Sauter e Soroka (1970). Geralmente, os valores obtidos nas medições foram menores, comparando-se aos valores teóricos. Foram observadas consideráveis oscilações, principalmente nos resultados relacionados à menor abertura, de 1,20 m x 0,60 m. Para tornar os resultados independentes das dimensões das aberturas, os dados foram representados em função de uma frequência normalizada (ka). Com isso, verificou-se que nas altas frequências ($ka > 7$), o coeficiente de absorção sonora (α) manteve-se constante e igual a 0,9, enquanto nas baixas frequências, notou-se uma dependência linear simples, conforme pode ser observado na Figura 29, a seguir:

Figura 29 - Resultados dos coeficientes médios de absorção medidas das diferentes configurações de aberturas, plotados em função de uma frequência normalizada (ka).



Fonte: Adaptado de Martellotta (2012, p. 2953).

Por fim, Martellotta (2012) elaborou um modelo, chamado de *modelo prático*, para relacionar a dimensão da abertura com os respectivos valores dos coeficientes de absorção, por meio da seguinte equação:

$$\alpha = \begin{cases} 0,0ka + 0,55, & 1 < ka < 7, \\ 0,9, & ka \geq 7. \end{cases} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

α = coeficiente de absorção sonora;

ka = frequência normalizada.

A validação do modelo foi feita por meio de medições em um ambiente real, com a obtenção de resultados precisos do tempo de reverberação, confirmando a aplicabilidade do *modelo prático* proposto por Martellotta (2012).

A maior parte das ferramentas de simulação computacional acústica assumem que os raios sonoros incidentes nas aberturas podem simplesmente dissipar para o meio externo, conforme aponta Martellotta (2012). Tal aproximação desse comportamento acústico pode funcionar bem em se tratando de grandes aberturas (pelo menos em comparação com o maior comprimento de onda de interesse). Em relação à situação na qual o comprimento de onda é comparável ou maior que a dimensão da abertura, a suposição do comportamento sonoro pode ser afetada, em função dos problemas de difração sonora. Neste caso, a abertura deve ser considerada como elemento absorvedor sonoro, de modo que os coeficientes de absorção acústica podem ser empregados nas fórmulas do Tempo de Reverberação (TR).

1.5 SÍNTESE DA SEÇÃO

A partir do referencial teórico apresentado, observou-se que as edificações escolares devem favorecer condições adequadas ao desenvolvimento das atividades de seus usuários, satisfazendo diferentes necessidades ambientais, entre elas, o conforto térmico e acústico.

Em função da necessidade de atendimento aos requisitos de conforto ambiental no contexto da arquitetura escolar, verificam-se determinadas situações de conflito entre as recomendações de projeto, a exemplo da utilização das aberturas. Torna-se necessária a inserção de aberturas para a entrada da ventilação natural, a fim de atender às exigências de conforto térmico, por outro lado, observa-se que as aberturas tornam as salas sujeitas ao ruído ambiental, o que conseqüentemente pode trazer prejuízos à inteligibilidade da fala, a depender do incômodo gerado pelo ruído.

O Diagrama de Bolt (1946) pode ser utilizado com a finalidade de adequar as dimensões do ambiente para uma melhor distribuição dos modos de ressonância, a partir de relações de proporção entre as dimensões de pé-direito, largura e comprimento preferenciais que possam evitar a formação de ondas estacionárias nos ambientes.

Se por um lado as aberturas permitem a entrada dos ruídos externos, por outro lado, são considerados perfeitos absorvedores acústicos, aspecto que contribui para o aumento da quantidade de absorção da sala, o que conseqüentemente pode favorecer a obtenção de resultados mais baixos do Tempo de Reverberação. Essa definição direcionará a consideração dos vãos de abertura como elementos absorvedores acústicos.

A contextualização da importância das aberturas para a ventilação natural em regiões de clima quente-úmido permitiu identificar as variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas como aspectos já estudados no campo do conforto térmico, mais precisamente relativa à ventilação natural. Por envolver decisões de projeto por parte do arquiteto, torna-se necessária a abordagem e estudos relacionados às implicações desses componentes arquitetônicos nos parâmetros acústicos, e conseqüentemente, na qualidade acústica interna.

O estudo dos principais aspectos que envolvem a acústica de salas serve de base para definição e direcionamento à simulação computacional acústica como ferramenta adequada para obtenção de dados, em se tratando de pesquisas as quais são estudadas a influência isolada de componentes arquitetônicos e suas implicações nos parâmetros de qualidade acústica.

Por meio dos parâmetros acústicos objetivos, é possível quantificar e mapear os resultados nos ambientes com o auxílio da simulação computacional, e assim, estimar a qualidade acústica de salas.

Verificou-se uma lacuna no campo da acústica de salas no que diz respeito à existência de estudos que abordem os impactos das aberturas na qualidade acústica interna, visto que a maior parte dos estudos se dedica aos ambientes fechados, que não necessitam, com frequência de ventilação natural, como em países de clima frio e temperado.

2 METODOLOGIA

De acordo com os procedimentos metodológicos realizados, a presente dissertação consiste em uma **análise paramétrica** da influência das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas na qualidade acústica de salas de aula, através da simulação computacional.

Os procedimentos realizados ao longo do presente trabalho foram reunidos em sete etapas. Segue a listagem das **etapas metodológicas**, e suas respectivas seções:

- Formação do referencial teórico (apresentado na seção 1);
- Levantamento de dados (Seção 2.1);
- Caracterização das salas de aula e das aberturas (Seção 2.2);
- Definição do modelo de sala de aula (Seção 2.3);
- Definição das variáveis: dimensão, localização e forma das aberturas (Seção 2.4);
- Simulação computacional acústica (Seção 2.5);
- Tratamento dos dados (Seção 2.6).

A seção 2.7 apresenta os subsídios obtidos para elaboração do modelo de sala de sala de aula empregado nas simulações computacionais.

2.1 LEVANTAMENTO DE DADOS

Na etapa em questão, foram realizados levantamentos de dados acerca dos aspectos físico-constructivos da arquitetura escolar no âmbito da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, a fim de caracterizar arquitetonicamente as salas de aula e as aberturas, para definição do modelo de sala de aula utilizado nas simulações acústicas.

De acordo com informações do Censo Escolar 2013, apresentado pelo Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira - INEP (INEP, 2013), está registrado o total de 94 escolas destinadas ao ensino fundamental na rede municipal de ensino de Maceió-AL.

Para realização do levantamento de dados, foram obtidos 84 projetos arquitetônicos disponíveis em arquivos digitais, fornecidos pelo Grupo de Estudos do Ambiente Sonoro - GEAS, da Universidade Federal de Alagoas, o que equivale a cerca de 89% do universo de edificações escolares registradas pelo INEP (INEP, 2013).

2.2 CARACTERIZAÇÃO DAS SALAS DE AULA E DAS ABERTURAS

Uma vez realizado o levantamento de dados relativo às edificações escolares, partiu-se para a caracterização das salas de aula e das aberturas, com a identificação das dimensões (largura, comprimento e pé-direito) recorrentes, percentuais de aberturas em relação à área de piso do ambiente, identificação dos materiais de acabamento e tipologias de aberturas predominantes empregados nas salas.

2.2.1 Materiais de acabamento internos das salas de aula e tipologias das aberturas

Baseados nos trabalhos sobre a arquitetura pública escolar local (OITICICA; ALVINO, 2005; OITICICA; MORAIS, 2012; SILVA, 2011; COSTA, 2012), além de visitas *in loco*, foi possível identificar os materiais de acabamento internos predominantes das salas de aula, bem como as tipologias mais recorrentes das aberturas.

2.2.2 Dimensões dos ambientes e percentuais de aberturas

A identificação das dimensões de salas de aula recorrentes foi realizada por meio da análise dos projetos arquitetônicos das escolas. Para viabilizar a contabilização das dimensões de salas de aula, foi necessário selecionar dentre o acervo de projetos disponível, as escolas que apresentavam o projeto arquitetônico com os seguintes itens: i) plantas-baixas, com as representações das aberturas e ii) cortes que representassem as salas de aula. Em função da ausência de desenhos e informações em determinados projetos arquitetônicos, a amostragem de escolas considerada na contabilização das dimensões de salas de aula compreendeu 56 escolas, o que corresponde em torno de 58% das escolas existentes da rede de ensino fundamental do município de Maceió-AL.

Nestas 56 edificações escolares, foram levantados os dados relativos às dimensões de 502 salas de aula. As salas de aula foram divididas em grupos e reunidas em intervalos em função das áreas desses ambientes, de ambientes de até 70m², com intervalos de variação de aproximadamente 5m². Para identificação das dimensões predominantes dentro de cada intervalo de áreas dos ambientes, realizou-se uma análise estatística baseada na moda. A moda de um conjunto é determinada como o valor de maior frequência de ocorrência, ou seja, o valor que mais se repete num conjunto de dados.

Considerou-se o desvio padrão de 10cm para mais e 10cm para menos em relação às dimensões de largura, comprimento e pé-direito durante o levantamento dos ambientes em arquivos digitalizados, em virtude das possíveis imprecisões construtivas.

Durante a contabilização das dimensões dos ambientes, observou-se que parte destes apresentavam teto inclinado. Neste caso, para contabilização, foi necessário considerar o pé-direito médio, a fim de viabilizar a análise das dimensões das salas de aula através do Diagrama de Bolt (1946), uma vez que o Diagrama se aplica a ambientes com forma retangular.

Em relação à caracterização das aberturas empregadas nas salas de aula, através dos projetos arquitetônicos, foi possível contabilizar os percentuais de abertura em relação à área de piso, dimensões de largura e altura das janelas, portas e rasgos nas paredes.

Para cada sala de aula presente na amostragem das escolas considerada no trabalho, foram contabilizadas os vãos das janelas e dos rasgos. Vale frisar que a realização de tal contabilização apresentou dificuldades, visto que na maior parte dos projetos arquitetônicos não há identificação das tipologias das aberturas, e portanto, das áreas efetivas de aberturas para ventilação de cada janela. Assim, a contabilização considerou a área do vão da janela como a área de abertura. Conforme mencionado anteriormente, um dos critérios para a seleção da amostragem dos projetos de escolas considerado no trabalho foi a existência de desenhos em planta-baixa das salas de aula com a representação das aberturas.

2.3 DEFINIÇÃO DO MODELO DE SALA DE AULA

A presente etapa subsidiou a definição do modelo de sala de aula empregado na simulação computacional, além disso, foi determinante para o alcance do primeiro objetivo específico proposto no trabalho, que por sua vez consistiu em adequar as dimensões (largura, comprimento e pé-direito) das salas de aula recorrentes em Maceió-AL, para atendimento de proporções preferenciais de dimensões para qualidade acústica.

A definição do modelo foi baseada nas dimensões (largura e comprimento) da sala de aula mais recorrente da amostragem considerada. Adicionalmente, a análise das proporções das dimensões de largura, comprimento e pé-direito dos ambientes, segundo a Escala do Diagrama de Bolt (1946), permitiu a identificação das dimensões mais favoráveis em relação à qualidade acústica, com o possível redimensionamento do pé-direito das salas.

Como complemento à avaliação das proporções das dimensões da sala selecionada como modelo representativo, foram realizados os cálculos modais do ambiente, com o auxílio da *Planilha Modos 6.0* (2013)¹⁰, elaborada por Sólón do Valle (2009), a fim de verificar a

¹⁰ A planilha *Modos 6.0* pode ser obtida através do endereço eletrônico: <http://musitec.com.br/downloads/>

distribuição e o número dos modos de sala por banda de frequência, de acordo com os critérios de Bonello (1981). Desse modo, foi possível selecionar as dimensões mais favoráveis à qualidade acústica, tendo como ponto de partida a sala de aula de dimensões (largura e comprimento) mais recorrente.

2.4 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS: DIMENSÃO, LOCALIZAÇÃO E FORMA DAS ABERTURAS

Em virtude das janelas consistirem nos principais elementos de abertura empregados nas salas de aula, o presente estudo baseou-se nas diversas combinações das variáveis de **dimensão, localização e forma** das aberturas para elaboração dos arranjos (modelos) simulados.

A elaboração dos modelos de simulação considerou os seguintes aspectos para cada uma das variáveis:

Quadro 1 - Listagem das variáveis das aberturas: dimensão, localização, forma e tipologia.

DIMENSÃO % de abertura total (janelas+rasgos)em relação à área de pisso	LOCALIZAÇÃO	FORMA
10%	1 LATERAL	QUADRADA
15%	CENTRAL	VERTICAL
20%	2 LATERAIS	HORIZONTAL
25%	LATERAL+CENTRAL	
30%	2 LATERAIS+CENTRAL	
35%		
40%		

A variável de **dimensão** das janelas baseia-se nos valores percentuais de 10%, 15%, 20%, 25% e 30%, 35% e 40% de abertura em relação à área de piso do ambiente. A escolha de tais valores foi baseada nas áreas percentuais recomendáveis pelas normas técnicas baseadas no desempenho térmico das edificações e no condicionamento térmico passivo, de recomendações técnicas do FUNDESCOLA, presentes nas fichas técnicas (MEC, 2002). Tais informações foram cruzadas com os valores percentuais de abertura mais recorrentes, identificados na etapa de caracterização das aberturas.

Em se tratando da variável de **localização** das aberturas, foram consideradas as possibilidades de arranjo de acordo com a disposição em planta-baixa: uma central; uma lateral; duas laterais; uma lateral e uma central; e duas laterais e uma central (Quadro 2).

Quadro 2 - Variável localização das aberturas: disposição das janelas em planta.

LOCALIZAÇÃO	REPRESENTAÇÃO EM PLANTA	REPRESENTAÇÃO EM VISTA
1 LATERAL		
CENTRAL		
2 LATERAIS		
LATERAL+CENTRAL		
2 LATERAIS+CENTRAL		

A variável **forma** das aberturas está associada às proporções entre largura e altura das janelas, que podem ser classificadas como janelas quadradas, alongadas na vertical e as janelas alongadas na horizontal (Quadro 3).

Quadro 3 - Variável forma das aberturas.

FORMA	REPRESENTAÇÃO EM VISTA
QUADRADA	
HORIZONTAL	
VERTICAL	

Embora a tipologia das aberturas seja considerada um dos aspectos que possivelmente interferem na ventilação natural nos ambientes internos, optou-se pela simplificação das janelas, considerando propriamente a abertura do vão, constituindo-se dessa forma, uma aproximação da referida tipologia. Tendo em vista que a tipologia de janela pivotante permite a quase totalidade de abertura do vão, a área efetiva de abertura corresponde à área do vão.

Uma vez definidas as variáveis das aberturas, partiu-se para a combinação, de modo que foram cruzados os aspectos referentes a cada uma das variáveis, da seguinte forma: os 7 (sete) diferentes valores percentuais de área de abertura (variável dimensão) foram combinados com outros 5 (cinco) diferentes configurações de localização das aberturas (variável localização) e combinados com 3 (três) diferentes formas das aberturas (variável forma). Assim, a partir das combinações, haveria a possibilidade de elaboração de 105 arranjos de aberturas, conforme consta no Apêndice A, pois $7 \times 5 \times 3$ corresponde a 105. Os arranjos foram representados em formato de desenhos em vista das paredes que contém as janelas. A elaboração das matrizes auxiliou na determinação dos conjuntos de arranjos a serem simulados (Apêndice A).

A fim de representar os diferentes arranjos de aberturas, tornou-se necessária a adoção de uma nomenclatura, com a elaboração de códigos, compostos pela letra "A", referente à abertura, seguido do algarismo correspondente à variável de dimensão da abertura (10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40%); além das siglas que indicam a variável de localização da abertura (1L = 1 lateral; 1C = 1 central; 2L = 2 laterais; 1L1C = 1 lateral + 1 central; 2L1C = 2 laterais + 1 central) e por fim, o código é composto pela primeira letra relativa à variável de forma da abertura (Q = quadrada, H = horizontal e V = vertical). Assim, como exemplo, um dos arranjos terá como nomenclatura, A-10-2L1C-Q.

Durante o processo de elaboração dos desenhos dos arranjos de aberturas, observou-se a impossibilidade em desenhar determinados arranjos, dependendo da combinação de algumas variáveis (dimensão, localização e forma), pois em alguns casos, para que a janela possuísse tal dimensão, a proporção entre a largura e a altura não poderia corresponder à determinada forma, em se tratando do modelo de sala de aula elaborado. Como exemplo da situação em questão, vale citar o arranjo de uma abertura vertical (forma), de 30% de dimensão em relação à área do piso (dimensão), localizada lateralmente à parede da sala (localização).

Após a verificação dos desenhos, foram selecionados os conjuntos de arranjos a serem simulados, com a escolha dos conjuntos mais completos. A descrição dos arranjos selecionados para a simulação são explicitados na *seção 3 - Resultados e Discussões*.

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL ACÚSTICA

Para obtenção dos resultados dos parâmetros acústicos, optou-se pela **simulação computacional**, pois através da simulação é possível estudar a interferência de um componente arquitetônico de maneira isolada na qualidade acústica de um ambiente, a partir das mudanças de suas configurações.

2.5.1 O programa de simulação computacional acústica

O programa de simulação acústica utilizado no trabalho consistiu no **Ease 4.3**, desenvolvido pela empresa alemã Acoustic Design Ahnert - ADA / AFMG Technologies GmBh (ACOUSTIC DESIGN AHNERT, 2013-b). O programa Ease dispõe de recursos de simulação, cálculos e apresentação dos resultados referentes aos parâmetros acústicos.

O Ease 4.3 utiliza-se da Equação de Sabine (1922) ou da Equação de Eyring (1930) para o cálculo clássico do Tempo de Reverberação (TR). No entanto, além do TR, parâmetros acústicos, como a Clareza (C_{50}), o Índice de Transmissão (STI) e a Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), podem ser obtidos por meio do método de traçado de raios e do método das fontes imagens. A partir dos dois métodos citados, aliados à técnica de resposta impulsiva, que é obtida através do módulo de auralização¹¹, os resultados de outros parâmetros acústicos são alcançados, tais como, Tempo de Decaimento Inicial (EDT) e Definição (D_{50}).

Os modelos virtuais referentes à geometria das salas podem ser elaborados no próprio programa ou no *Autocad*, da empresa Autodesk, e *SketchUP*, da Empresa Google, e podem posteriormente ser exportados para o programa Ease 4.3 (ACOUSTIC DESIGN AHNERT, 2013-b). Os dados de entrada necessários para a simulação correspondem às características acústicas dos materiais que constituem as superfícies internas, tais como coeficientes de absorção por banda de frequência, fontes sonoras e áreas destinadas ao público ouvinte.

Os resultados dos parâmetros acústicos fornecidos pelo programa podem ser visualizados por meio de gráficos e arquivo de dados, além de mapas acústicos, com a

¹¹ A *auralização* é o processo de simulação acústica que torna audível o campo sonoro de uma fonte num ambiente através da modelagem física e matemática (EVEREST, 2001).

representação espacial dos resultados dos parâmetros no ambiente, conforme pode-se observar no exemplo a seguir, na Figura 30.

Figura 30 - Exemplo de resultado em formato de mapa acústico obtido através do programa Ease 4.3.



Fonte: Acoustic Design Ahnert (2013-b).

2.5.2 Os parâmetros acústicos avaliados

Tendo em vista a relevância de determinados parâmetros acústicos na avaliação da qualidade acústica de salas de aula, conforme apontado na *seção 1: Referencial Teórico*, bem como os recursos disponíveis na versão do programa de simulação adotado, foram considerados os seguintes parâmetros acústicos:

- Tempo de Reverberação (TR);
- Clareza (C_{50});
- Índice de Transmissão da Fala (STI);
- Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons).

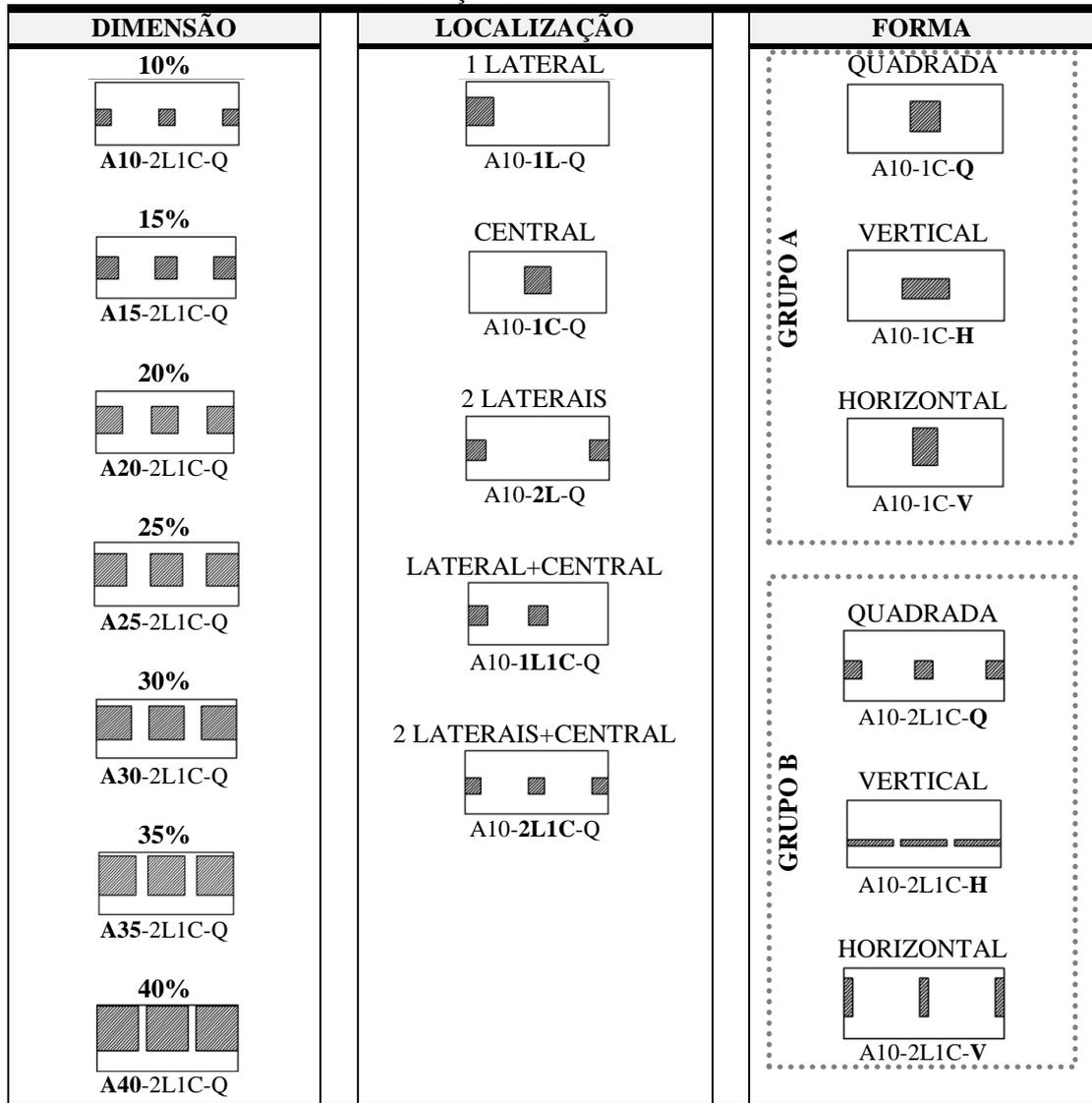
2.6 TRATAMENTO DOS DADOS

Os resultados obtidos por meio das simulações computacionais acústicas foram organizados em gráficos e tabelas e analisados de acordo com as etapas descritas a seguir.

2.6.1 Influência da Dimensão, Localização e Formas das Aberturas nos Resultados dos Parâmetros Acústicos

A fim de analisar separadamente a influência de cada uma das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas nos resultados dos parâmetros acústicos, os arranjos (modelos) selecionados foram agrupados em conjuntos, de forma que somente a variável de interesse fosse modificada, mantendo as demais variáveis fixas (Quadro 4). As matrizes completas dos arranjos podem ser consultadas no Apêndice A.

Quadro 4 - Conjuntos de arranjos das aberturas selecionados para a simulação acústica: variáveis dimensão, localização e forma das aberturas.



Para avaliação da influência da variável de dimensão, os arranjos agrupados possuem como variáveis fixas a localização e forma das aberturas, alterando-se apenas a dimensão, ou seja, os percentuais de área das aberturas em relação à área de piso. Em relação à variável localização, os arranjos possuem como variáveis fixas a dimensão e a forma. Para o estudo da influência da variável forma, os arranjos avaliados mantiveram fixos a variável de dimensão e localização.

A fim de comparar os resultados dos parâmetros acústicos, os valores de cada conjunto de arranjos foram apresentados por meio de gráficos. Em relação ao Tempo de Reverberação (TR) e Clareza (C_{50}), os valores de cada modelo foram organizados em função das frequências sonoras, de 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000 e 8000 Hz. Foram coletados os valores dos parâmetros C_{50} , Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na

Articulação de Consoantes (%ALCons) mais críticos em cada uma das simulações, que corresponde aos valores registrados no assento menos favorecido da sala de aula. Assim, é possível avaliar a situação mais prejudicial para o aluno/ouvinte, tendo como pressuposto de que na sala de aula, deveriam ser garantidas condições satisfatórias de inteligibilidade da fala, independente da localização na área dos assentos/público receptor.

Para complementar a comparação e a avaliação da qualidade acústica das salas de aula, os resultados dos parâmetros acústicos obtidos através das simulações acústicas foram verificados em relação à conformidade com as recomendações técnicas e normas relacionadas, conforme descritos na Tabela 4:

Tabela 4 - Parâmetros acústicos com seus respectivos valores recomendáveis.

PARÂMETROS ACÚSTICOS	VALORES RECOMENDÁVEIS	REFERÊNCIAS
Tempo de Reverberação (TR)	0,6s (para salas de aula desocupadas, de volume de até 283m ³ , nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz)	ANSI S12.60 (2002)
Clareza (C₅₀)	Valores de C ₅₀ acima de 2 dB favorecem a inteligibilidade da palavra. A classificação pode ser feita da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> • Acima de 7 dB: Excelente; • 2 a 7 dB: Bom; • 2 a -2 dB: Razoável; • -2 a -7 dB: Deficiente; • Abaixo de -7 dB: Ruim. 	Marshall (1994)
Índice de Transmissão da Fala (STI)	Quanto mais próximo de 1 (um) melhor será o STI, de modo que a classificação pode ser feita da seguinte forma: <ul style="list-style-type: none"> • 0.75 a 1: Excelente; • 0.6 a 0.75: Bom; • 0.45 a 0.6: Razoável; • 0.3 a 0.45: Ruim; • 0 a 0.3: Inaceitável. 	IEC 60268-16 (2011)
Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)	Quanto mais próximo de 0% (zero) melhor será a (%ALCons). A classificação por intervalos de valores é a seguinte: <ul style="list-style-type: none"> • 0% a 3%: Excelente; • 3% a 7%: Bom; • 7% a 15%: Razoável; • 15% a 33%: Ruim; • Acima de 33% Inaceitável. 	IEC 60268-16 (2011)

2.6.2 Distribuição Espacial dos Resultados dos Parâmetros Acústicos na Sala de Aula

A presente etapa, juntamente com a etapa anterior, foram necessárias para o cumprimento do segundo objetivo específico da dissertação, que por sua vez corresponde a quantificar e mapear os efeitos dos parâmetros de qualidade acústica em salas de aula, de acordo com as alterações das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas.

Os resultados principais dos parâmetros acústicos representados através dos mapas acústicos foram determinantes na avaliação da distribuição dos resultados espacialmente, na área de audiência da sala de aula. Foi possível apontar áreas mais favoráveis e menos no ambiente, verificando a influência na qualidade acústica em função da alteração das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas, na medida em que os resultados poderiam sofrer alterações nos assentos.

Foram analisados os mapas acústicos de C_{50} (na frequência de 500Hz), STI e %ALCons, bem como os gráficos da frequência das distribuições de valores de cada parâmetro nos assentos da sala, ambos fornecidos pelo programa Ease 4.3. Além disso, a comparação dos resultados entre os arranjos (modelos) foi complementada pelas classificações propostas pela norma IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011), em se tratando dos parâmetros STI e %ALCons; além da escala de classificações proposta por Marshall (1994) em relação ao C_{50} .

2.6.3 Obtenção de Resultados Recomendáveis de Parâmetros Acústicos com Base na Influência das Aberturas

A etapa em questão, em conjunto com a próxima etapa a ser descrita (seção 2.6.4), foram necessárias para o atendimento do terceiro objetivo específico proposto no trabalho. Para obtenção de resultados recomendáveis de parâmetros acústicos, com base na influência das aberturas, foi analisado o estudo da tendência do comportamento estatístico do Tempo de Reverberação (TR) em função do percentual de área de abertura.

Com base nessa relação, é possível por meio do método estatístico de ajuste de curva¹² de tendência, estimar os valores de percentual de área de abertura que atendam aos valores desejados do TR, e portanto, alcançar valores recomendáveis para a qualidade acústica.

Foi empregado o programa CurveExpert Basic (HYAMS, 2009) para a avaliação do ajuste de curva de tendência com melhor grau de aproximação da correlação entre os dados do TR e percentual de área de abertura em relação à área de piso. O programa em questão efetua o ajuste de diversas curvas de tendência de equações pré-programadas, estabelecendo um

¹² *Ajuste de Curva* é um método que consiste em encontrar uma curva que se ajuste a uma série de pontos e que possivelmente cumpra uma série de parâmetros adicionais. É muito utilizado para fazer-se extrapolações a partir de dados conhecidos.

ranqueamento em função dos parâmetros de qualidade estatísticos de coeficiente de correlação¹³ e desvio padrão¹⁴.

Com o intuito de validar o resultado, um novo modelo de sala de aula com configuração de área de abertura em relação à área de piso fornecido pela equação ajustada foi simulado no Ease 4.3 (ACOUSTIC DESIGN AHNERT, 2013-b).

2.6.4 Uso Combinado de Aberturas e Materiais Absorvedores para Obtenção de Resultados Recomendáveis de Parâmetros Acústicos

Tendo em vista que nem sempre é possível a obtenção de resultados favoráveis dos parâmetros acústicos a partir da utilização das aberturas, avaliou-se a possibilidade do uso de materiais absorvedores nas superfícies internas do ambiente. Foram consideradas situações de alteração dos materiais componentes, e respectivamente dos seus coeficientes de absorção sonora, somente no teto, somente na parede e ambos simultaneamente.

A obtenção dos resultados foi fundamentada a partir do cálculo do coeficiente médio ponderado de absorção sonora (α_m), no qual o valor do α_m é obtido a partir da média ponderada da absorção de todas as superfícies que compõem o ambiente e suas respectivas áreas (Equação 16).

$$\alpha_m = \frac{(S_1 \cdot \alpha_1) + (S_2 \cdot \alpha_2) + \dots + (S_n \cdot \alpha_n)}{S_{total}} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde,

α_m = Coeficiente médio ponderado de absorção sonora;

S_n = Área de cada superfície (m²);

α_n = Coeficiente de absorção sonora de cada superfície;

S_{total} = Área total das superfícies.

2.7 MODELOS PARA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os modelos utilizados nas simulações computacionais foram elaborados conforme os procedimentos metodológicos descritos anteriormente, ou seja, com base no levantamento de dados acerca dos aspectos físico-construtivos da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, na identificação das dimensões de salas de aula mais recorrentes, adequação de

¹³ *Coeficiente de correlação*: mede o grau da correlação entre duas variáveis. Quanto mais próximo a 1, melhor a correlação.

¹⁴ *Desvio padrão*: mostra o quanto de variação ou "dispersão" existe em relação à média (ou valor esperado). Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média; um desvio padrão alto indica que os dados estão espalhados por uma gama de valores.

dimensões de acordo com o Diagrama de Bolt (1946) e na definição dos arranjos das aberturas (combinações de variáveis).

2.7.1 Materiais de acabamento internos das salas de aula e tipologias das aberturas

As paredes das salas de aula são compostas em sua maioria, de alvenaria de tijolos rebocada e pintada. Do piso à 1,50m de altura, observa-se o emprego de revestimento cerâmico nas paredes. Entre os revestimentos de piso mais empregados nesses ambientes, observa-se a utilização de granilite, revestimento cerâmico e argamassa de cimento e areia (cimentado). Quanto à composição do teto, verifica-se a ausência de forro, ou seja, telha cerâmica sem forro; enquanto no caso do uso do forro, nota-se o emprego de forro de policloreto de polivinila (PVC), bem como a utilização de laje.

Como componentes arquitetônicos destinados à ventilação natural nas salas de aula, têm-se as janelas e os rasgos¹⁵. Em relação à tipologia das aberturas recorrentes, observa-se a utilização das janelas do tipo basculante, de aço e vidro, e janelas pivotantes verticais, de madeira (Figura 31). As janelas do tipo basculante apresentam menor área efetiva de abertura para ventilação, pois somente parte das lâminas de vidro podem ser manipuladas para abertura do vão, diferentemente da janela do tipo pivotante vertical, que permite a total abertura do vão.

Figura 31 - Tipologias de janelas predominantes, empregadas nas salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL. (a) Janela do tipo basculante. (b) Janela do tipo pivotante vertical.



(a)



(b)

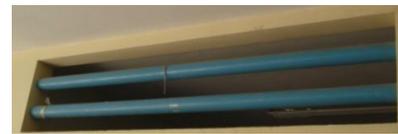
Observa-se a existência de rasgos nas paredes, geralmente opostos às janelas e voltados para os corredores (Figura 32). Os rasgos representam a totalidade da área de abertura do vão e objetivam proporcionar a ventilação cruzada no ambiente, pois desempenham a função de saída da corrente de ar interna.

¹⁵ No presente trabalho, o termo "rasgo" foi adotado com a finalidade de diferenciar das aberturas maiores, no caso, para diferenciar das janelas.

Figura 32 - Tipologias dos rasgos predominantemente empregadas nas salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL: (a) Rasgos com um cilindro de ferro galvanizado. (b) Rasgos com dois cilindros de ferro galvanizado.



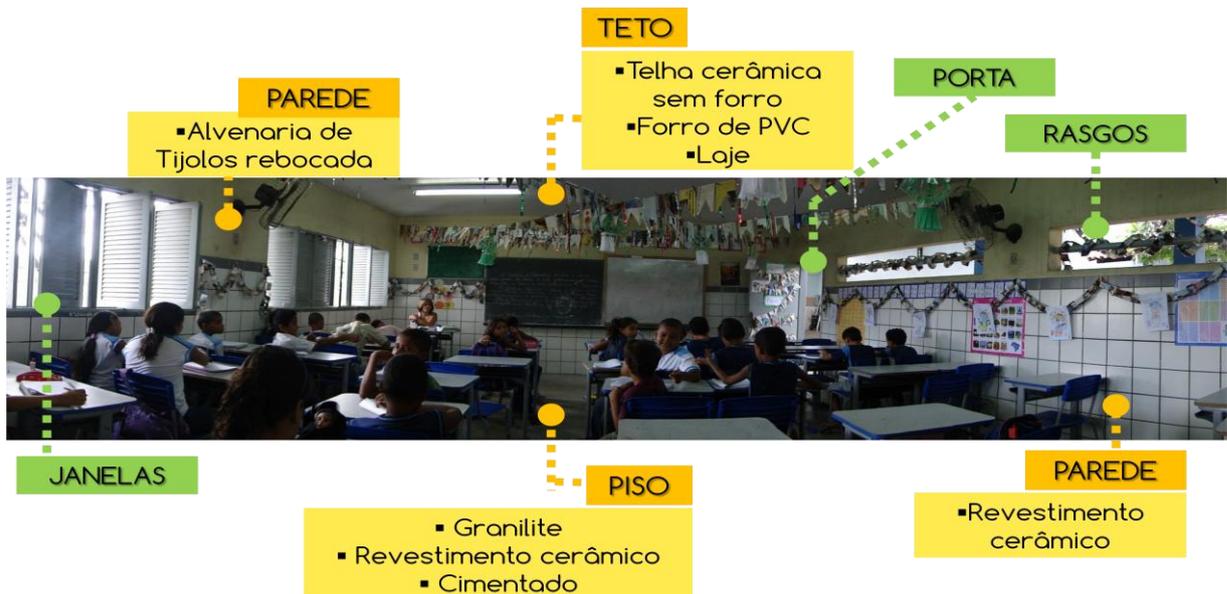
(a)



(b)

A Figura 33 apresenta uma síntese dos materiais de acabamento e dos componentes arquitetônicos numa sala de aula, que pode ser considerada como uma sala de aula representativa da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.

Figura 33 - Sala de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, com a indicação dos materiais de acabamento interno predominantes, além da indicação da disposição das aberturas em relação às paredes.



Fonte: Adaptado de Oiticica e Morais (2012).

2.7.2 Dimensões dos ambientes e percentuais de aberturas

A Tabela 5 apresenta os dados relativos às dimensões de salas de aula da amostragem analisada de projetos arquitetônicos da rede pública municipal de ensino de Maceió, divididas em grupos relativos às áreas dos ambientes:

Tabela 5 - Amostragem das salas de aula contabilizadas da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL: áreas, número de salas, relação ao total de 502 salas (%), dimensões e volume.

Ordem das salas por predominância	Área da sala de aula (m ²)	Número de salas de aula	Relação ao total de 502 salas de aula (%)	Dimensões predominantes			Volume (m ³)
				Largura (m)	Comprimento (m)	Pé-direito (m)	
11 ^a	Até 20	1	0,20%	3,5	5,7	3,1	61,85
8 ^a	20,01 a 25	8	1,59%	3,4	6	2,7	55,08
6 ^a	25,01 a 30	30	5,98%	5	6	2,9	87,00
7 ^a	30,01 a 35	30	5,98%	4,9	6,5	3,55	113,07
5 ^a	35,01 a 40	41	8,17%	5,1	7,1	3	108,63
4 ^a	40,01 a 45	62	12,35%	5,8	7,3	3	127,02
1 ^a	45,01 a 50	182	36,25%	6	8	3	144,00
2 ^a	50,01 a 55	71	14,14%	6	9	2,8	151,20
3 ^a	55,01 a 60	68	13,55%	7,2	8,1	3	174,96
9 ^a	60,01 a 65	5	1,00%	7,6	8	3,6	218,88
10 ^a	65,01 a 70	4	0,80%	6	10,85	3	195,30

Conforme pode-se observar, a maioria das salas de aula possuem área entre 45,01 a 50m², sendo que as dimensões predominantes dos ambientes nesse conjunto apresentam 6m de largura, 8m de comprimento e 3m de pé-direito. A segunda sala de aula mais predominante apresenta dimensões de 6m de largura, 9m de comprimento e 2,80m de pé-direito. A terceira sala de aula mais predominante possui 7,20m de largura, 8,10m de comprimento e pé-direito de 3m. A quarta sala de aula mais recorrente apresenta, predominantemente, as seguintes dimensões: 5,80m de largura, 7,30m de comprimento e 3m de pé-direito.

A contabilização dos percentuais de aberturas (janelas e rasgos) em relação à área de piso das salas de aula pode ser observada na Tabela 6:

Tabela 6 - Contabilização dos percentuais de aberturas (janelas e rasgos) em relação à área de piso das salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.

Janelas e rasgos	
% de abertura total (janelas+rasgos) em relação à área de piso	Relação ao total de 502 salas de aula (%)
Até 5%	1,70%
5,01% a 10%	19,46%
10,01% a 15%	22,14%
15,01% a 20%	42,58%
20,01% a 25%	9,25%
25,01% a 30%	4,38%
30,01% a 35%	0,49%

Verifica-se que a maioria das salas de aula possuem de 15,01 a 20% de área de abertura em relação à área de piso. Assim, observa-se que a maior parte das salas de aula analisadas atendem à recomendação da área mínima da abertura para ventilação natural em

relação à área de piso, estabelecida pelo FUNDESCOLA (MEC, 2002), que deve corresponder no mínimo, a 1/8 de abertura em relação à área de piso, ou seja, a no mínimo, 12,5%. Além disso, observa-se que a maioria das salas atendem ao percentual mínimo recomendável para abertura indicado pela NBR 15575 – Edifícios habitacionais – Desempenho (Partes 1, 4 e 5) (ABNT, 2013), ao apresentar percentuais acima de 8% de abertura em relação à área de piso.

Embora a maioria das salas de aula tenha atendido às referidas recomendações, vale ressaltar que a área efetiva de abertura para ventilação natural pode ser mais crítica, ao lembrar da dificuldade de contabilização das áreas efetivas de abertura das janelas.

De acordo com a NBR 15220 - Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005), nota-se que as salas de aula em estudo não atendem ao percentual mínimo de abertura exigido para ventilação natural cruzada permanente, que por sua vez estabelece para a Zona Bioclimática 8, na qual Maceió-AL está inserida, a utilização de no mínimo, 40% de abertura em relação à área de piso.

As aberturas caracterizadas como rasgos, em sua maioria, correspondem entre 2,01 e 6% de aberturas em relação à área de piso, conforme pode ser observado na Tabela 7:

Tabela 7 - Contabilização dos percentuais de aberturas (rasgos) em relação à área de piso das salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL.

Rasgos	
% de abertura (rasgos) em relação à área de piso	Relação ao total de 502 salas de aula (%)
Até 2%	10%
2,01% a 4,0%	42%
4,01% a 6,0%	30%
6,01% a 8,0%	15%
8,01% a 10%	4%

2.7.3 Arranjos das aberturas (combinações das variáveis)

Conforme referido anteriormente, a variável de dimensão das aberturas baseia-se em valores percentuais de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de abertura em relação à área de piso do ambiente.

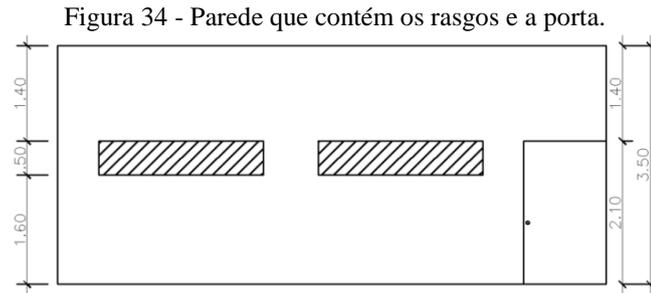
Adotou-se as proporções de 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de abertura em relação à área de piso no modelo devido à recomendação do FUNDESCOLA, uma vez que as aberturas para ventilação natural nas salas de aula devem corresponder a 1/8 da área de piso ou mais, ou seja, deve apresentar no mínimo, 12,5% de abertura em relação à área de piso (MEC, 2002). Além disso, os referidos percentuais de abertura foram considerados com a

finalidade de atender à recomendação estabelecida pela NBR 15575 - Edifícios habitacionais - Desempenho (Partes 1, 4 e 5) (ABNT, 2013), que por sua vez sugere área de abertura de no mínimo, 8% em relação à área de piso, para edificações localizadas no região nordeste do Brasil. Além disso, os valores percentuais de 10%, 15% e 20% de abertura em relação à área de piso foram adotados por estes representarem valores frequentes entre as salas de aula do universo estudado.

O percentual de 40% foi adotado por se tratar de uma recomendação presente na NBR 15220 – Desempenho Térmico de Edificações (ABNT, 2005). A presente norma indica a utilização de grandes aberturas, com área mínima correspondente a 40% de abertura em relação à área de piso do ambiente, como estratégia para a Zona Bioclimática 8, zona a qual a cidade de Maceió-AL está inserida.

Cada um dos valores percentuais de abertura em relação à área de piso correspondem ao somatório da área de janela e de rasgos. Dessa forma, por exemplo, o valor percentual de 10% de abertura em relação à área de piso corresponde a 5% de rasgos em relação à área de piso e 5% de janelas em relação à área de piso. O valor percentual constante de 5% de rasgos em relação à área de piso foi adotado de acordo com a análise estatística, pois os valores mais frequentes de percentual de abertura de rasgos em relação à área de piso encontra-se entre 2,01% a 6%, assim, optou-se em considerar um valor intermediário aproximado desse percentual, que foi de 5%.

A Figura 34 apresenta a elevação (vista) da parede que contém os rasgos, com a distribuição de dois rasgos, de modo que cada um possui 1,2m² de área de abertura, o que totaliza 2,4m², e portanto, 5% de área de abertura em relação à área de piso, considerando o ambiente modelo representativo das salas de aula, de dimensões 6m (largura), 8m (comprimento) e 3,5m (pé-direito). A porta considerada possui largura mínima do vão de acordo com as recomendações presentes nos Cadernos Técnicos: Subsídios para a Elaboração de Projetos e Adequação de Edificações Escolares, vols. 1-4 (MEC, 2002), que por sua vez estabelece no mínimo, 1,20m de largura. Portanto, a porta apresenta dimensões de 1,20m de largura por 2,10m de altura.



A Tabela 8 apresenta os percentuais de abertura em relação à área de piso, áreas de aberturas e representação das dimensões da janela na parede.

Tabela 8 - Variável dimensão das aberturas: percentual de abertura em relação à área de piso, áreas de aberturas e representação das dimensões da janela na parede

DIMENSÃO					
DIMENSÃO	ÁREA DE ABERTURA TOTAL* (RASGOS+JANELAS)	DIMENSÃO	ÁREA DE ABERTURA DE JANELA*	PERCENTUAL DE ABERTURA DE JANELA EM RELAÇÃO À ÁREA DE PAREDE**	REPRESENTAÇÃO EM VISTA***
Percentual de abertura total (janelas+rasgos) em relação à área de piso		Percentual de abertura de janela em relação à área de piso			
10%	4,8m ²	5%	2,4m ²	8,58%	
15%	7,2m ²	10%	4,8m ²	17,14%	
20%	9,6m ²	15%	7,2m ²	25,71%	
25%	12m ²	20%	9,6m ²	34,28%	
30%	14,4m ²	25%	12m ²	42,86%	
35%	16,8m ²	30%	14,4m ²	51,49%	
40%	19,2m ²	35%	16,8m ²	60,00%	

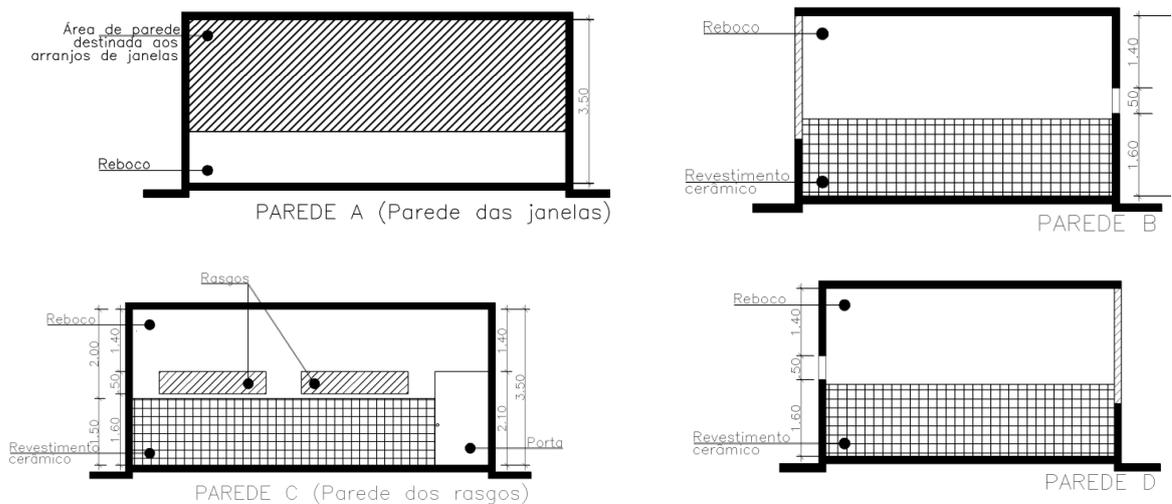
* As áreas de abertura, em m², dependem das dimensões do piso do ambiente. No presente trabalho, as áreas de abertura apresentadas na tabela são relativas à sala de aula modelo, de dimensões 6m (largura), 8m (comprimento) e 3,5m (pé-direito).

** O percentual de abertura de janela em relação à área de parede refere-se à parede na qual encontram-se as janelas, ou seja, a parede de fachada.

*** A representação em vista do percentual de abertura de janela em relação à área de parede refere-se à parede na qual encontram-se as janelas, ou seja, a parede de fachada, que por sua vez possui contato com o meio exterior à edificação.

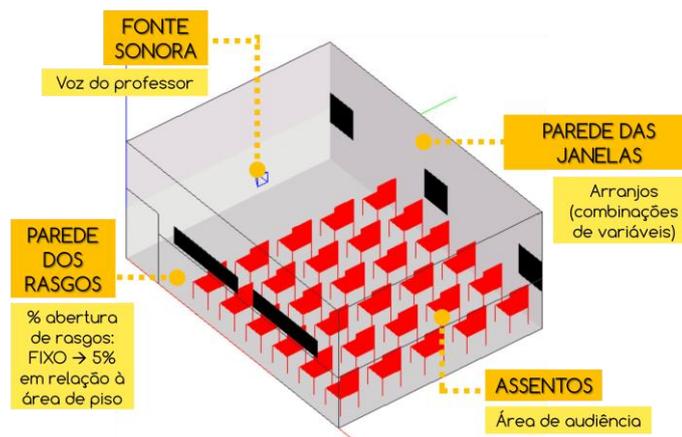
Os aspectos referentes à variável de localização e forma das aberturas foram apresentadas na seção 2.4 *Definição das variáveis: dimensão, localização e forma das aberturas*.

Figura 36 - Modelo da sala de aula: elevações (dimensões em metros).



As geometrias dos modelos de salas de aula em função das diversas combinações das variáveis das aberturas foram inicialmente elaboradas no programa *SketchUP*, e em seguida, foram exportadas para o programa de simulação acústica *Ease 4.3* (Figura 37). No *SketchUP*, as geometrias foram modeladas a partir do desenho das faces internas dos ambientes, com a divisão em *layers*, ou camadas, que correspondem a cada material ou superfície interna. Após a modelagem das geometrias no *SketchUP* e a exportação dos arquivos para o programa *Ease 4.3*, iniciou-se a configuração dos modelos, com a inserção dos dados de entrada.

Figura 37 - Modelo da sala de aula no *Ease 4.3*, com a representação das características.



Fonte: Adaptado de Acoustic Design Ahnert (2013-b).

Os materiais componentes das superfícies internas da sala adotados nos modelos de simulação são baseados nos materiais mais recorrentes, identificados na etapa de caracterização das salas de aula da rede pública, a fim de representar o mais próximo possível as condições reais das salas de aula em estudo. Os dados de entrada no programa referentes

aos materiais de acabamento internos são referentes aos coeficientes de absorção sonora (α), apresentados na Tabela 9:

Tabela 9 - Coeficientes de absorção sonora (α) dos materiais componentes do modelo de sala de aula utilizado nas simulações acústicas.

MATERIAL		Frequência (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
PAREDE	Reboco liso sobre alvenaria de tijolos ou blocos	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
	Revestimento cerâmico	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02
PISO	Concreto aparente, tratado e polido	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02
TETO	Reboco	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
ABERTURA	Vão aberto	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
PORTA	Porta de madeira comum pintada	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10

Fontes: Adaptado de Bistafa (2006, p. 236-237).

A fonte sonora utilizada nas simulações acústicas trata-se da voz humana, ou seja, a voz do professor. Adotou-se uma das configurações padrões da voz humana masculina disponível no programa, denominada de *man shout*, e foi disposta a 1,7m acima do piso, que corresponde à altura de um indivíduo adulto, e localiza-se de forma central, à frente dos assentos dos alunos, a 3m de distância da parede das janelas.

O ruído de fundo adotado nas simulações foi de 50 dB(A), estimado para a sala desocupada. Tal valor foi adotado considerando valores aproximados em medições de ruído experimentais em salas de aula desocupadas na cidade de Maceió, apresentados em trabalhos, conforme apontam as referências Silva (2011) e Oiticica e Morais (2012). Além disso, o referido nível de ruído de fundo consiste no nível limite aceitável pela NBR 10152 – Níveis de Ruído para Conforto Acústico (ABNT,1987).

No programa Ease 4.3, utilizou-se o mapeamento com reflexões (*mapping with reflections*) como forma de simulação, para cálculo dos parâmetros Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons). O número de raios considerados foi 8000, com base nos estudos realizados por Nogueira (2012), que realizou ensaios experimentais e numérico para uma sala com dimensões equivalentes a empregada no presente trabalho, obtendo convergência entre os modelos utilizando 8000 raios. Para o cálculo de Tempo de Reverberação (TR) realizado nas simulações, foi utilizada a Equação de Sabine (1922).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No corrente capítulo são discutidos os resultados obtidos, conforme os objetivos e metodologia propostos. A seção 3.1 apresenta a análise das dimensões das salas de aula mais recorrentes da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, utilizadas como base para definição do modelo empregado nas simulações computacionais. A seção 3.2 trata da avaliação da influência das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas na qualidade acústica de salas de aula. A seção 3.3 discorre acerca da avaliação da distribuição espacial dos parâmetros acústicos na sala de aula. A seção 3.4 discute a obtenção de resultados recomendáveis de parâmetros acústicos com base na influência das aberturas. A seção 3.5 trata do uso combinado de materiais absorvedores acústicos e de aberturas (janelas) para obtenção de valores recomendáveis de parâmetros acústicos. A síntese dos resultados é apresentada na seção 3.6.

3.1 ANÁLISE DAS DIMENSÕES DAS SALAS DE AULA

Tendo em vista que as dimensões da sala influenciam na distribuição uniforme do som no ambiente, a análise das dimensões das salas de aula de acordo com a Escala do Diagrama de Bolt (1946) permite averiguar se a relação de proporcionalidade das dimensões de largura, comprimento e pé-direito encontra-se na área que corresponde aos modos de ressonância acústica mais favoráveis na sala, ou seja, dentro uma escala onde a distribuição dos modos de sala é considerada uniforme. O Diagrama é utilizado para avaliar ambientes com formato retangular, também chamados *shoe boxes*, aplicado à região de baixa frequência, que geralmente vai até 300Hz.

Conforme apresentado anteriormente, por meio da relação de proporção $1 : X : Y$, é possível identificar se as dimensões do ambiente enquadram-se na Área de Bolt (1946). No presente estudo, a dimensão X está relacionada à largura da sala, enquanto a dimensão Y representa o comprimento do ambiente. O número 1 diz respeito à dimensão do pé-direito (altura). Dessa forma, para o cálculo das proporções da sala, divide-se o valor do pé-direito (altura) pelo mesmo, o que totaliza no número inteiro 1, enquanto os valores X e Y são divididos pelo valor do pé-direito (altura)

A Tabela 10 e a Figura 38 apresentam os resultados da análise do Diagrama de Bolt (1946) para a amostragem de salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, com as respectivas proporções das dimensões.

recorrente, chamada de Sala 6, com área de 30m² e a 7ª sala de aula mais recorrente, chamada de Sala 7, com área de 31,85m. A Sala 10, uma das salas menos recorrentes, não foi representada no Diagrama de Bolt (1946), na Figura 38, por encontrar-se muito distante da Área de Bolt.

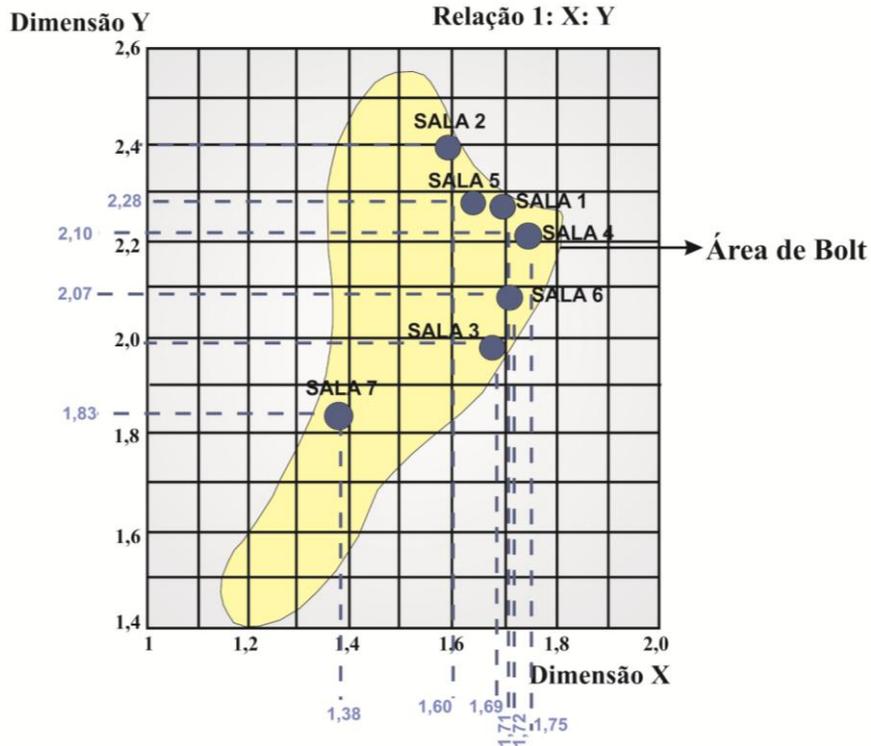
Por meio do redimensionamento do pé-direito, é possível enquadrar as dimensões das demais salas na Área de Bolt, ou seja, pode-se adequar as dimensões (largura, comprimento e pé-direito) das salas de aula para atendimento de proporções de dimensões recomendáveis para qualidade acústica. Assim, a Sala 1, antes com pé-direito de 3m, passou a ter 3,5m. A Sala 2 apresentava pé-direito de 2,8m e passou a ter 3,75m. A Sala 3, possuía pé-direito de 3m, e a partir do redimensionamento passou a apresentar 4,25m. Em se tratando das Salas 8, 9, 10 e 11, não é possível a aplicação do Diagrama de Bolt (1946), pois as proporções entre largura e comprimento inviabilizam o atendimento à Área de Bolt, mesmo com a modificação da dimensão do pé-direito.

A Tabela 11 apresenta o redimensionamento do pé-direito das Sala 1, 2, 3, 4 e 5, destacado com a cor alaranjada. Na Figura 39, são apresentadas as referidas salas com as novas proporções entre as dimensões e a locação das proporções das dimensões dos ambientes na Escala do Diagrama de Bolt (1946).

Tabela 11 - Redimensionamento da dimensão do pé-direito das Salas 1, 2 e 3 para adequação das proporções das dimensões na Área de Bolt, na Escala do Diagrama de Bolt (1946)

Ordem das salas por predominância	Área da sala de aula (m ²)	Relação ao total de 502 salas de aula (%)	Dimensões predominantes				Proporções			Está na Área de Bolt?
			Largura (m)	Comprimento (m)	Pé-direito (m) ANTERIOR	Pé-direito (m) NOVO	Altura	X	Y	
11ª	Até 20	0,20%	3,5	5,7	3,10	--	--	--	--	NÃO SE APLICA
8ª	20,01 a 25	1,59%	3,4	6	2,70	--	--	--	--	NÃO SE APLICA
6ª	25,01 a 30	5,98%	5	6	2,9	--	1	1,72	2,07	SIM (Sala 6)
7ª	30,01 a 35	5,98%	4,9	6,5	3,55	--	1	1,38	1,83	SIM (Sala 7)
5ª	35,01 a 40	8,17%	5,1	7,1	3,0	3,1	1	1,64	2,29	SIM (Sala 5)
4ª	40,01 a 45	12,35%	5,8	7,3	3,0	3,3	1	1,75	2,21	SIM (Sala 4)
1ª	45,01 a 50	36,25%	6	8	3,0	3,5	1	1,71	2,28	SIM (Sala 1)
2ª	50,01 a 55	14,14%	6	9	2,8	3,75	1	1,60	2,40	SIM (Sala 2)
3ª	55,01 a 60	13,55%	7,2	8,1	3,0	4,25	1	1,69	1,90	SIM (Sala 3)
9ª	60,01 a 65	1,00%	7,6	8		--	--	--	--	NÃO SE APLICA
10ª	65,01 a 70	0,80%	6	10,85		--	--	--	--	NÃO SE APLICA

Figura 39 - Localização das proporções das dimensões das Salas de aula 1, 2 e 3, 4 e 5 no Diagrama de Bolt, (1946) após o redimensionamento da dimensão do pé-direito.



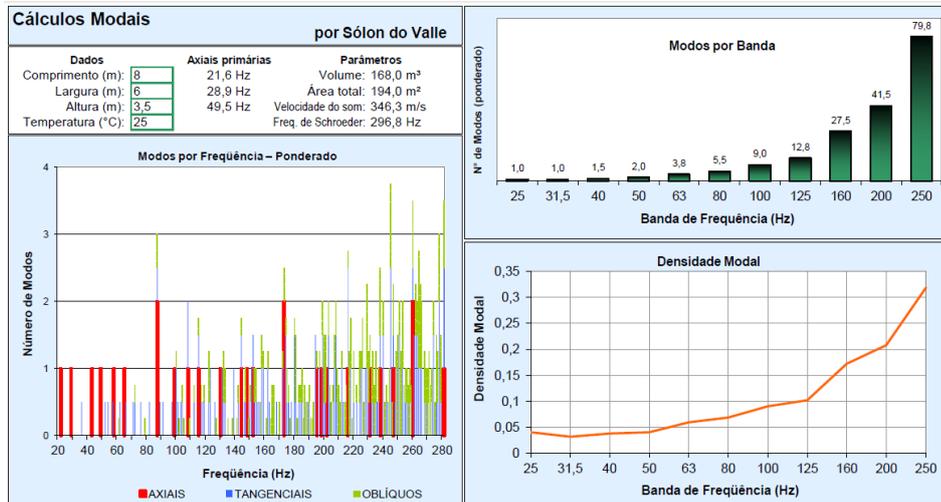
Diante dos resultados obtidos, selecionou-se a sala de aula com dimensões de largura e comprimento mais recorrentes da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL para utilização nas simulações computacionais, tendo em vista a sua expressiva ocorrência entre os projetos arquitetônicos, bem como o seu potencial de melhoria acústica, a partir do redimensionamento do pé-direito, que por sua vez contribui para as condições adequadas de ressonância da sala, de acordo com o Diagrama de Bolt (1946). Portanto, a sala de dimensões 6m (largura), 8m (comprimento) e 3,5m (pé-direito) consiste no ambiente modelo.

Vale ressaltar que a sala de aula mais recorrente da rede municipal de ensino de Maceió-AL, identificada no presente trabalho, as dimensões de largura (6m) e comprimento (8) são similares à sala de aula mais recorrente da rede pública de ensino de Campinas - SP, identificado no trabalho de Amorim (2007), além da sala de aula mais recorrente da rede pública de ensino de Florianópolis, conforme apontado no trabalho de Losso (2003), aspectos que reforçaram ainda mais a escolha das dimensões (largura e comprimento) de sala de aula para o presente estudo.

De acordo com os resultados obtidos a partir da *Planilha Modos 6.0* (2013), observou-se que ao modelo de sala de aula selecionado apresenta uma distribuição ascendente do número de modos por banda de frequência, pois com o aumento da frequência, há o aumento

do número de modos, o que indica que as frequências modais estão distribuídas adequadamente (Figura 40).

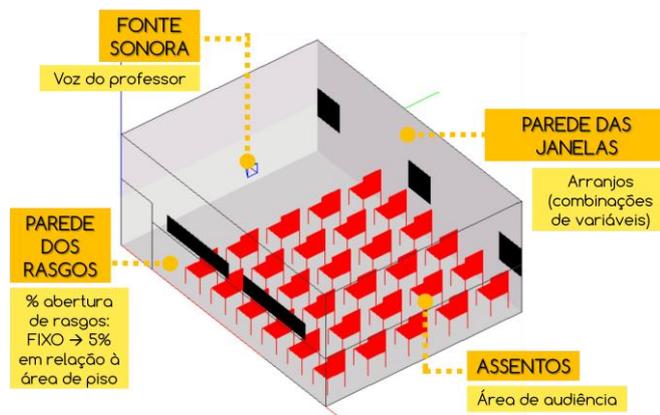
Figura 40 - Cálculos modais realizados na *Planilha Modos* (2013) da Sala Modelo.



3.2 INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DAS ABERTURAS

Conforme apresentado anteriormente, o modelo da sala de aula utilizado nas simulações computacionais acústicas no programa Ease 4.3 (ACOUSTIC DESIGN AHNERT, 2013-b), apresenta dimensão de 6m (largura), 8m (comprimento) e 3,5 (pé-direito) (Figura 41). Vale lembrar que em todos os arranjos (modelos), os rasgos, localizados na parede oposta às janelas, mantiveram-se fixos, com área de abertura de 5% em relação à área de piso. A parede das janelas consiste na única partição sujeita a alterações.

Figura 41 - Modelo de sala de aula.



Os resultados dos parâmetros acústicos Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) apresentam variabilidade espacial, de acordo com a localização no ambiente. Dessa forma, os valores dos

parâmetros apresentados no estudo da influência das variáveis de dimensão (seção 3.2.1 *Influência da Dimensão das Aberturas*), localização (seção 3.2.2 *Influência da Localização das Aberturas*) e forma (seção 3.2.3 *Influência da Forma das Aberturas*) das aberturas correspondem aos valores mais críticos em cada uma das simulações, ou seja, aos valores registrados no assento menos favorecido da sala de aula. Assim, é possível avaliar a situação mais prejudicial para o aluno/ouvinte, tendo como pressuposto de que na sala de aula, deveria ser garantida condições satisfatórias de inteligibilidade da fala, independente da localização na área dos assentos/público receptor.

Para análise dos resultados dos parâmetros acústicos serão enfatizadas as frequências sonoras a partir de 500Hz, visto que a maior contribuição para a inteligibilidade da fala é obtida a partir dessa faixa de frequência.

3.2.1 Influência da Dimensão das Aberturas

A variável de dimensão das aberturas baseia-se nos valores percentuais de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% em relação à área de piso da sala de aula. Vale lembrar que cada um dos valores percentuais de abertura correspondem ao somatório da área de janela e de rasgos, uma vez que foi considerada um valor percentual constante de 5% de rasgos em relação à área de piso. Assim, por exemplo, o valor percentual de 10% de abertura em relação à área de piso corresponde a 5% de rasgos e 5% de janelas em relação à área de piso.

Para o estudo da influência da dimensão das aberturas na qualidade acústica de salas de aula, foram selecionados o conjunto de arranjos de janelas quadradas, distribuídas em três vãos de abertura, sendo duas laterais e mais uma central. Assim, a forma (quadrada) e a localização (2 laterais + central) das aberturas mantiveram-se fixas, variando-se apenas a dimensão das aberturas. Segue representação das aberturas avaliadas, com os respectivos códigos dos modelos (Quadro 5):

Quadro 5 - Arranjos das aberturas avaliadas segundo a variável de dimensão

LOCALIZAÇÃO: 2 Laterais + Central							
FORMA: Quadrada							
DIMENSÃO	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
REPRESENTAÇÃO							
MODELO	A10-2L1C-Q	A15-2L1C-Q	A20-2L1C-Q	A25-2L1C-Q	A30-2L1C-Q	A35-2L1C-Q	A40-2L1C-Q

Os resultados completos do Tempo de Reverberação (TR) foram organizados na tabela presente no Apêndice B. Os resultados críticos dos demais parâmetros acústicos avaliados segundo a variável de dimensão das aberturas, também constam no Apêndice B.

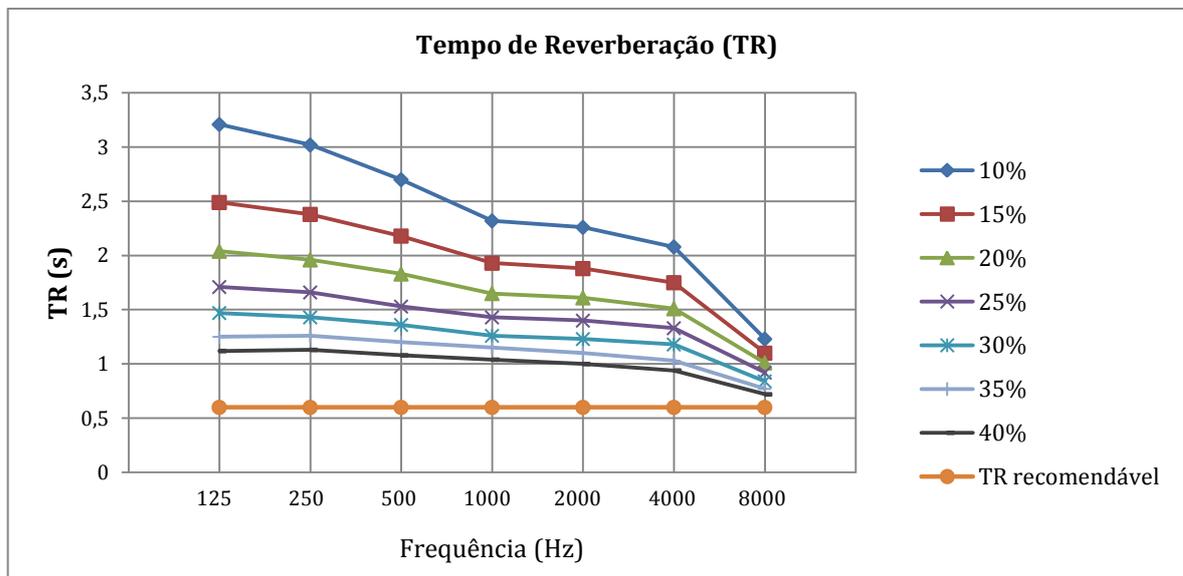
Tempo de Reverberação (TR)

Ao considerar o efeito da variável de dimensão das aberturas, verifica-se que os valores de Tempo de Reverberação (TR) excedem às recomendações presentes nas normas ANSI S12.60: *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools* (ANSI, 2002) e NBR 12179 - Tratamento acústico em recintos fechados (1992).

Uma vez que a norma ANSI S12.60 (2002) indica TR de até 0,6s para salas de aula desocupadas, de volume de até 283m³, nas frequências de 500, 1000 e 2000 Hz, pode-se observar, através do Gráfico 1, que o arranjo com 40% de abertura em relação à área de piso (modelo A40-2L1C-Q) obteve os valores mais favoráveis de TR, embora possua valores acima de 1s na maior parte das frequências consideradas.

Observa-se uma forte dependência do parâmetro TR em função da frequência, de modo que há a tendência da diminuição dos valores de TR com o aumento da frequência.

Gráfico 1 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável de dimensão das aberturas



É possível observar que os valores de TR sofreram alterações significativas em função do percentual de área de abertura. Verifica-se que com o aumento da área de abertura, há um decréscimo dos valores de TR para todas as situações avaliadas, de modo que a menor dimensão da abertura, de 10% (modelo A10-2L1C-Q), apresentou os valores mais elevados,

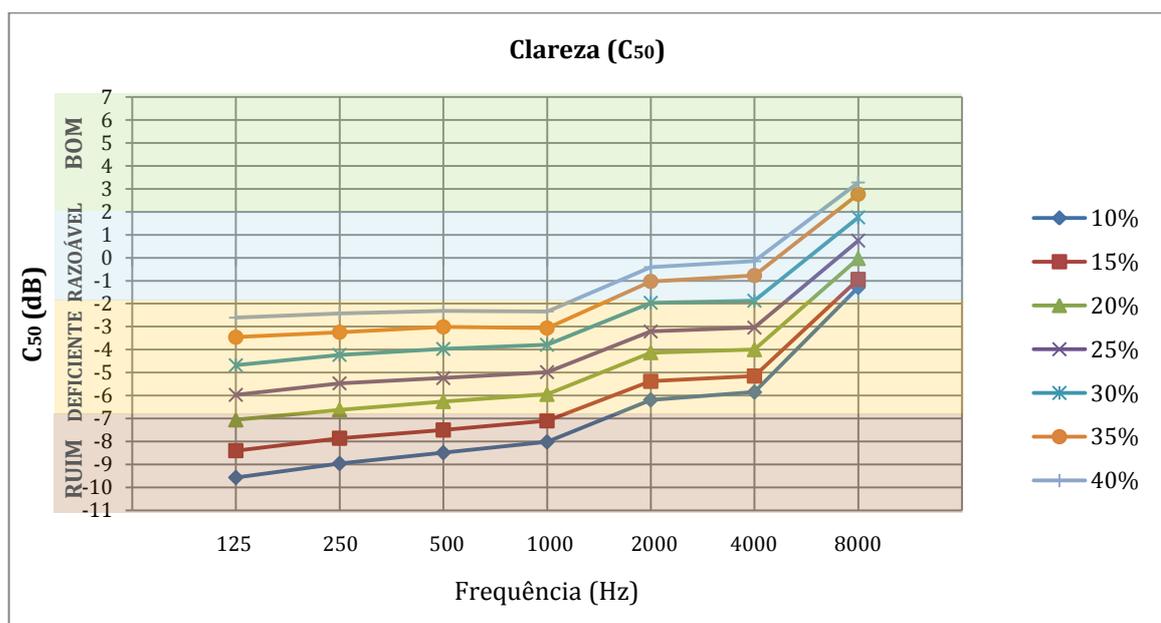
enquanto o maior percentual de abertura, que corresponde neste caso, a 40% de abertura em relação à área de piso (modelo A40-2L1C-Q), obteve os valores mais favoráveis do parâmetro.

As simulações comprovam que com a alteração da área de abertura (janelas), do menor percentual para do maior percentual de abertura estudada, de 10% para 40%, o TR passa de 2,7s para 1,08s (na frequência de 500Hz), o que aponta um decréscimo de cerca de 60% do valor de TR. Verifica-se que a cada aumento de 5% de área de abertura de janela, há uma melhoria nos valores de TR (frequência de 500Hz) em torno de 10% a 19%.

Clareza (C_{50})

Os resultados de Clareza (C_{50}), conforme apresentados no Gráfico 2, indicam que o aumento da dimensão das aberturas acarreta em melhorias nos valores do parâmetro.

Gráfico 2 - Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável de dimensão das aberturas



Observou-se que nas frequências abaixo de 500Hz, os arranjos de 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de abertura obtiveram valores classificados como deficientes, de acordo com a escala de classificação proposta por Marshall (1994), pois os valores encontram-se abaixo de -2dB (na frequência de 500Hz), enquanto os arranjos de 10% e 15% de abertura apresentaram valores considerados ruins, uma vez que estão abaixo de -7dB (na frequência de 500Hz). Em relação às frequências superiores a 500Hz, a maior parte dos resultados dos arranjos podem ser indicados como deficientes; porém, vale destacar os arranjos de 30%, 35% e 40% de

abertura, por apresentarem valores que podem ser enquadrados como razoáveis (acima de -2dB), particularmente nas frequências mais altas, acima de 2000Hz.

Para fins de comparação, com o aumento da dimensão da abertura, de 10% para 40%, verifica-se que o valor de C_{50} , passa de -8,49dB para -2,31dB (frequência de 500Hz), o que representa uma melhoria nos resultados críticos por volta de 72% nos resultados.

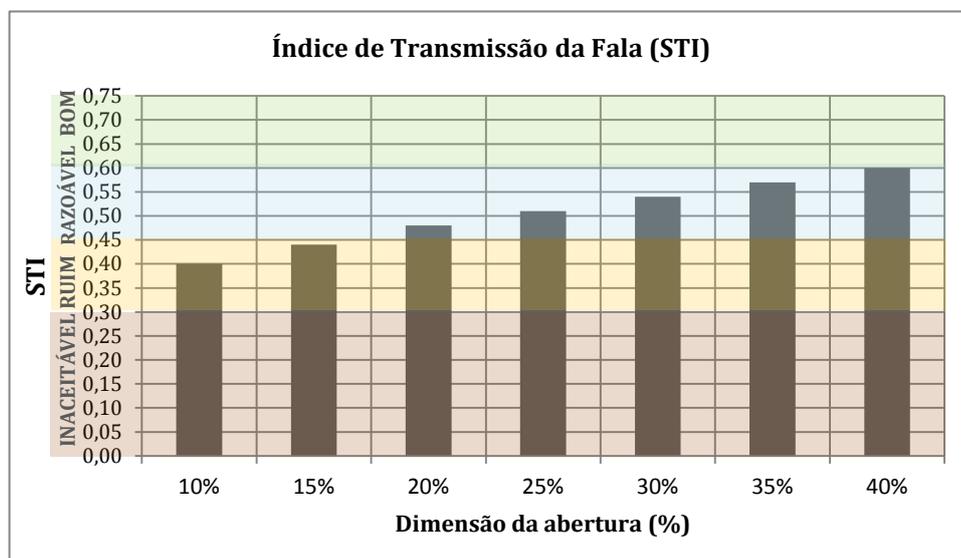
Ao comparar a variação dos valores de C_{50} em função do aumento a cada 5% de área de abertura dos arranjos, verifica-se o acréscimo no C_{50} (frequência de 500Hz) em torno de 12% a 24%, a depender do arranjo.

Índice de Transmissão da Fala (STI)

Os valores do Índice de Transmissão da Fala (STI) variam entre 0 (inteligibilidade nula) e 1 (inteligibilidade ótima), assim, quanto mais próximo de 1 (um), melhores condições de inteligibilidade da fala podem ser alcançados.

Os resultados indicam que com o aumento da área de abertura, valores mais favoráveis de STI são observados, conforme ilustrado no Gráfico 3. Com os percentuais de 20%, 25%, 30% e 35% de abertura em relação à área de piso, a sala apresentou valores de STI considerados como razoáveis, segundo a norma IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011). O arranjo de 40% de abertura apresenta o melhor resultado de STI, de 0,60, que pode ser classificado como bom.

Gráfico 3 - Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável de dimensão das aberturas



Ainda de acordo com a classificação sugerida pela norma IEC 60268-16 (IEC, 2011), os arranjos com 10% (modelo A10-2L1C-Q) e 15% (modelo A15-2L1C-Q) de abertura obtiveram valores de STI enquadrados como ruins, visto que apresentaram STI de 0,40 e 0,44, respectivamente.

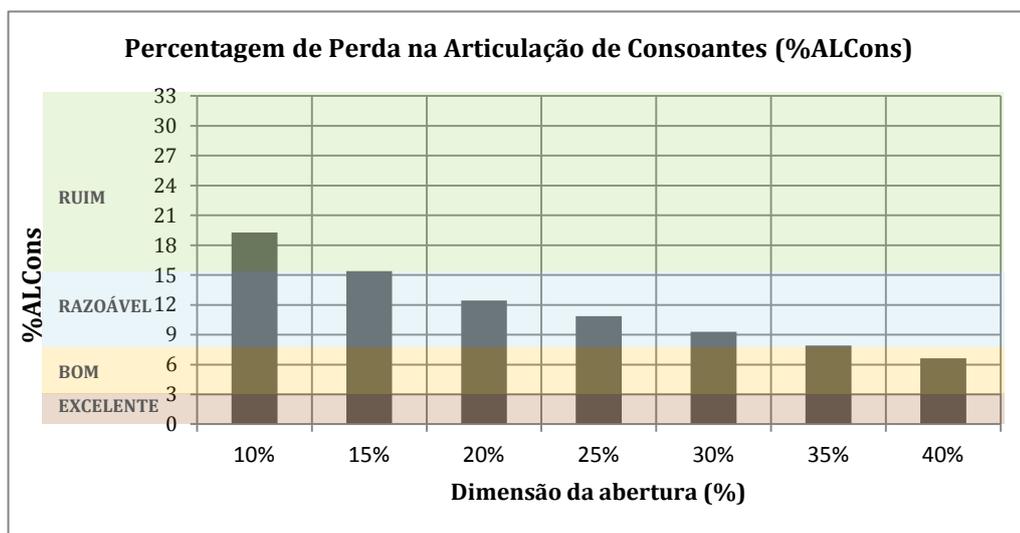
Em relação à melhoria dos resultados de STI em função do aumento da dimensão da abertura, constata-se que a mudança do arranjo com 10% (modelo A10-2L1C-Q) de abertura para 40% (modelo A40-2L1C-Q), respectivamente, o valor passa de 0,40 para 0,60, o que representa um acréscimo por volta de 33% nos resultados. O aumento em 5% de área de abertura dos arranjos representa o ganho em torno de 5% a 10% nos valores de STI, em se tratando dos arranjos avaliados.

Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

A Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) trata-se de um parâmetro com comportamento inverso ao STI, de maneira que em ambientes com maiores perdas na articulação de consoantes, menores valores de STI podem ser encontrados. Portanto, quanto mais próximo de 0% (zero) de %ALCons, melhor será a inteligibilidade da fala.

Assim como os resultados dos parâmetros discutidos anteriormente, os valores críticos de %ALCons mais favoráveis foram obtidos com o aumento da dimensão das aberturas, conforme ilustrado no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Resultados da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável de dimensão das aberturas



Ao classificar os resultados críticos do %ALCons de acordo com a escala de classificação da norma IEC 60268-16 (IEC, 2011), observa-se que os arranjos de 10% e 15% de abertura podem ser considerados como ruins. Os arranjos de 20%, 25%, 30% e 35% de abertura em relação à área de piso, podem ser classificados como razoáveis, pois estes resultados encontram-se no intervalo de %ALCons entre 7% e 15% da escala de classificação. O arranjo com 40% de abertura em relação à área de piso apresentou o melhor resultado crítico, com o alcance de %ALCons de 6,64%, classificado como bom, pois este valor encontra-se no intervalo de %ALCons entre 3% e 7%, segundo a norma IEC 60268-16 (IEC, 2011).

O efeito do aumento da dimensão da abertura, de 10% (modelo A10-2L1C-Q) para 40% (modelo A40-2L1C-Q) em relação à área de piso, implica em uma melhoria nos valores de %ALCons por volta de 65%, passando %ALCons de 19,28% (arranjo com 10% de abertura, modelo A10-2L1C-Q) a %ALCons de 6,64% (arranjo com 40% de abertura, modelo A40-2L1C-Q). Ao relacionar a variação dos valores de %ALCons em função do acréscimo em 5% de área de abertura dos arranjos, os resultados sugerem uma melhoria que varia em torno de 13% a 20% nos valores.

3.2.2 Influência da Localização das Aberturas

Tendo em vista o estudo da influência da variável de localização das aberturas nos resultados dos parâmetros acústicos, são consideradas as possibilidades de arranjo das janelas de acordo com a disposição em planta-baixa, que podem ser dispostas tanto na lateral e/ou central na parede da sala de aula.

Os resultados da influência da localização referem-se ao conjunto de arranjos de aberturas de forma (quadrada) e de dimensão de 10% de área de abertura em relação à área de piso. Assim, para a presente avaliação, a dimensão (10%) e a forma (quadrada) das aberturas mantiveram-se fixas, variando-se apenas a localização das aberturas, conforme ilustrado no Quadro 6.

Quadro 6 - Arranjos das aberturas avaliadas segundo a variável de localização

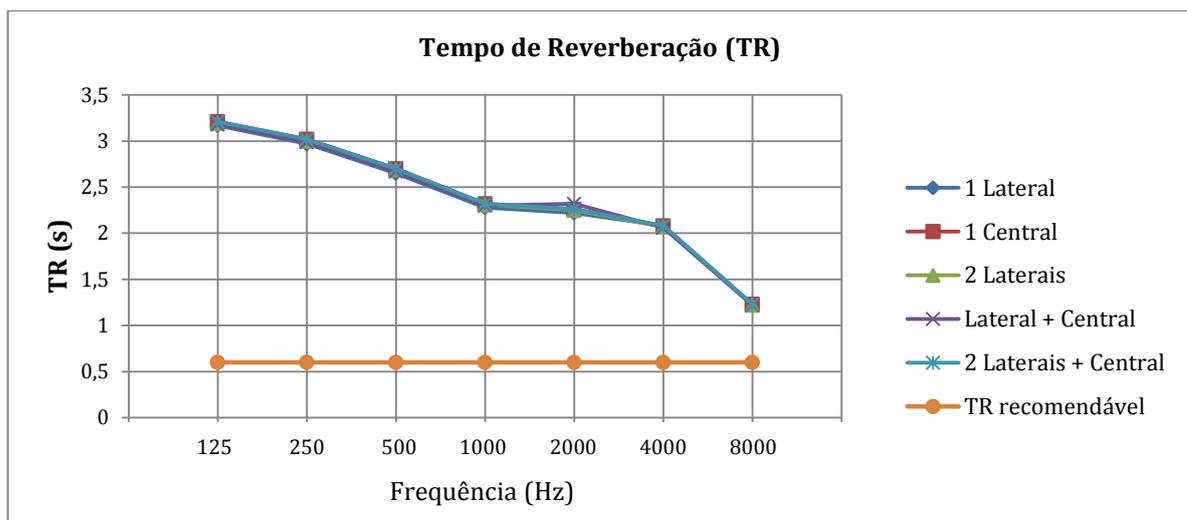
DIMENSÃO: 10%					
FORMA: Quadrada					
LOCALIZAÇÃO	1 Lateral	1 Central	2 Laterais	Lateral + Central	2 Laterais + Central
REPRESENTAÇÃO EM VISTA					
REPRESENTAÇÃO EM PLANTA					
MODELO	A10-1L-Q	A10-1C-Q	A10-2L-Q	A10-1L1C-Q	A10-2L1C-Q

Os resultados completos do Tempo de Reverberação (TR) foram organizados na tabela presente no Apêndice C, além dos resultados críticos dos demais parâmetros acústicos segundo a variável de localização das aberturas.

Tempo de Reverberação (TR)

Quanto ao efeito da localização das aberturas, verificou-se que os resultados do Tempo de Reverberação (TR) da sala de aula foram praticamente iguais para todos os arranjos simulados, de modo que as mudanças nos valores foram discretas, como é possível observar no Gráfico 5, com a sobreposição das as linhas representativas dos arranjos. Observa-se que a variação máxima entre os valores de TR por arranjos corresponde a cerca de 2%.

Gráfico 5 - Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável de localização das aberturas



Em virtude dos arranjos avaliados possuírem o mesmo percentual de área de abertura em relação à área de piso, e portanto, quantidades semelhantes de absorção sonora, os valores

de TR apresentaram variação diminuta por arranjo, o que indica que a variável de dimensão das aberturas trata-se do aspecto de maior sensibilidade nos resultados.

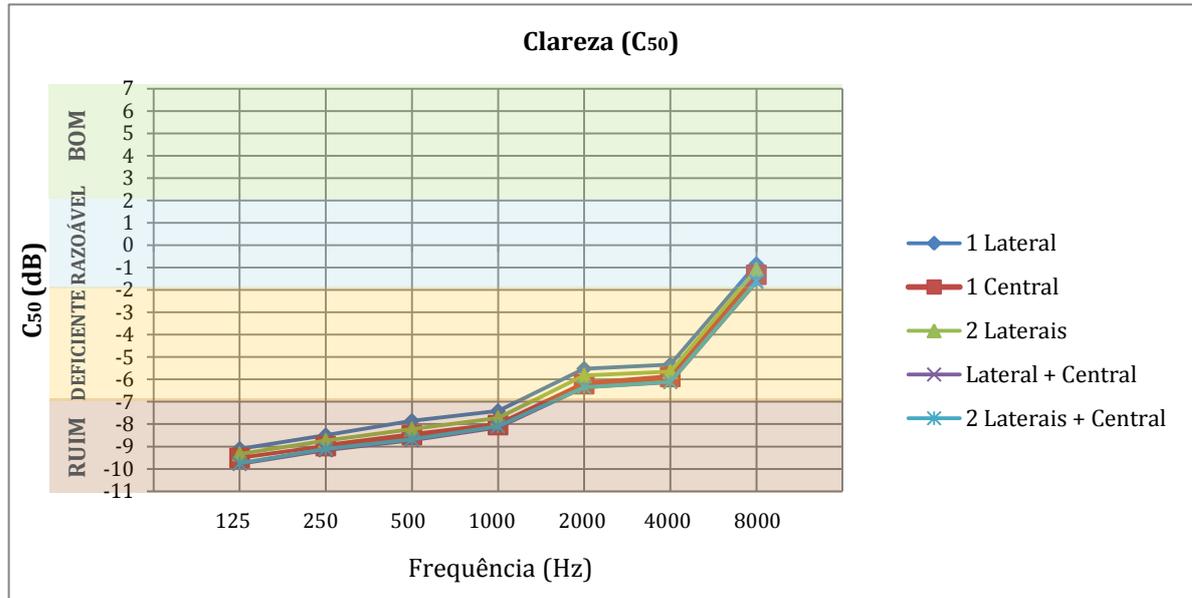
Visto que os arranjos selecionados no estudo do efeito da localização das aberturas possuem como variável fixa a dimensão (arranjos com 10% de abertura em relação à área de piso), verifica-se que os valores de TR encontrados convergem para os valores de TR obtidos no estudo da variável de dimensão das aberturas. Assim, torna-se desnecessário averiguar o atendimento às recomendações normativas, uma vez que na seção 3.2.1 *Influência da Dimensão das Aberturas* foi discutido a respeito.

Clareza (C₅₀), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

Devido às diferenças sutis entre os arranjos nos resultados dos parâmetros de Clareza (C₅₀), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), optou-se em agrupá-los na apresentação dos resultados e análises.

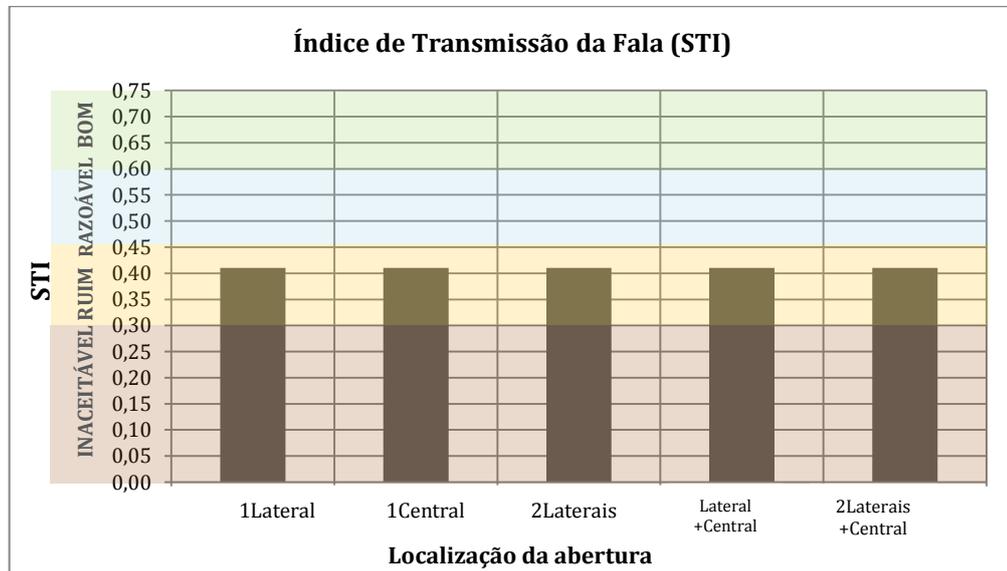
Em relação à **Clareza (C₅₀)**, os resultados sofreram alteração em função da localização das aberturas, de um arranjo para outro, conforme apresentados no Gráfico 6. A variação máxima encontrada entre os arranjos de maior valor crítico (modelo A10-1L-Q) e menor valor crítico (modelo A10-1L1C-Q) de C₅₀ corresponde a cerca de 10%, em se tratando da frequência de 500Hz.

Dentre os arranjos simulados, é possível observar que o arranjo composto de uma janela localizada lateralmente (modelo A10-1L-Q), trata-se do modelo que alcançou os resultados de C₅₀ ligeiramente mais favoráveis.

Gráfico 6 - Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável de localização das aberturas

Os valores críticos do **Índice de Transmissão da Fala (STI)** de todos os arranjos em questão foram iguais, de 0,41, conforme apresentados no Gráfico 7, porém, é importante salientar que há diferenças na distribuição espacial dos resultados.

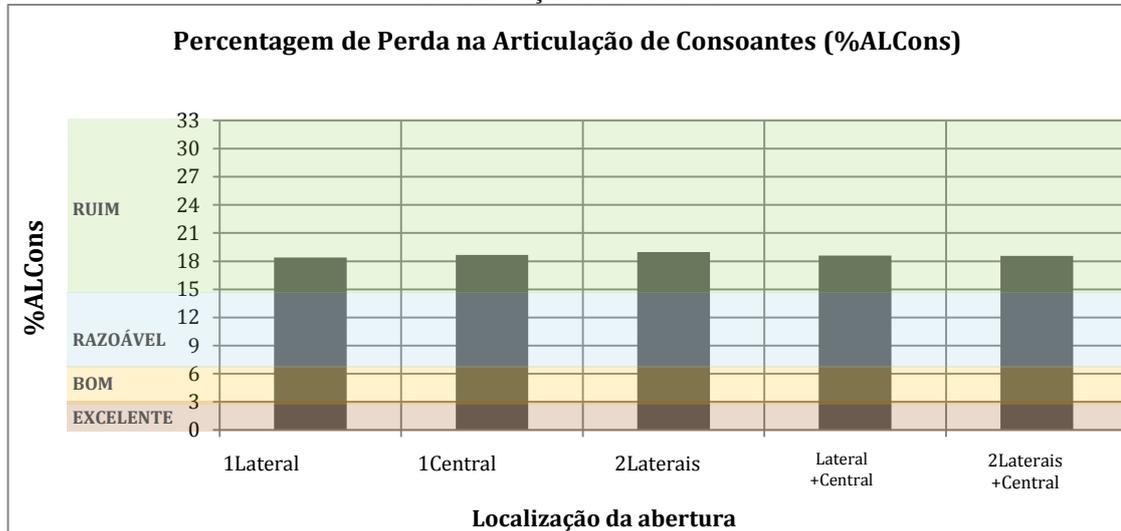
Gráfico 7 - Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável de localização das aberturas



Assim como os parâmetros anteriores, os valores críticos da **Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)** foram aproximados, entre 18,40% e 18,97%, resultando em uma variação de cerca de 3%, o que sugere que a variável de localização interfere de modo discreto nos resultados do parâmetro acústico em questão (Gráfico 8).

Embora os resultados de %ALCons tenham apresentado pequena variação em função da localização, é possível identificar o arranjo com resultados mais favoráveis, o arranjo composto de uma janela localizada lateralmente (modelo A10-1L-Q).

Gráfico 8 - Resultados da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável de localização das aberturas



Embora os valores críticos de C_{50} , STI e %ALCons tenham apresentado pouca variação entre os arranjos simulados, verifica-se que com a alteração da localização das aberturas, os resultados dos parâmetros acústicos apresentam modificações por assento, conforme será discutido na seção 3.3 *Distribuição espacial dos resultados dos parâmetros acústicos nas salas de aula*.

3.2.3 Influência da Forma das Aberturas

Vale lembrar que a variável forma das aberturas está associada às proporções entre largura e altura das janelas, classificadas como janelas quadradas, alongadas na vertical e as janelas alongadas na horizontal.

Foram selecionados dois grupos de arranjos de aberturas para obtenção dos resultados por meio da simulação computacional, chamados de Grupo A e Grupo B, nos quais a variável forma das aberturas foi o único aspecto a ser alterado.

O Apêndice D apresenta os resultados completos do Tempo de Reverberação (TR), bem como os resultados críticos dos demais parâmetros acústicos avaliados segundo a variável forma das aberturas.

a) Grupo A

O primeiro conjunto de arranjos analisado trata das aberturas de dimensão de 10% em relação à área de piso, sendo uma janela localizada de maneira central à parede que as contém (Quadro 7).

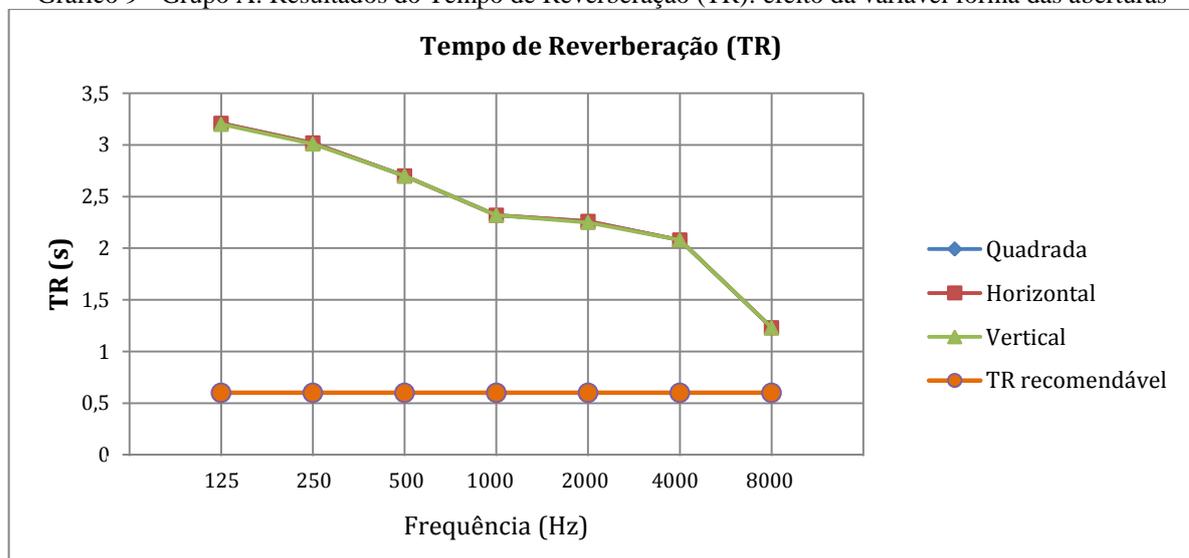
Quadro 7 - Arranjos I das aberturas avaliadas segundo a variável forma

DIMENSÃO: 10%			
LOCALIZAÇÃO: Central			
FORMA	Quadrada	Horizontal	Vertical
REPRESENTAÇÃO			
MODELO	A10-1C-Q	A10-1C-H	A10-1C-V

Tempo de Reverberação (TR)

Tendo em vista o efeito da variável forma das aberturas, verificou-se que os resultados do Tempo de Reverberação (TR) da sala de aula foram similares para as três configurações simuladas, conforme apresentado no Gráfico 9. As mudanças do TR por arranjo ocorreram somente nas frequências de 125Hz, 250Hz e 2000Hz, com variação máxima de aproximadamente 0,5% entre os arranjos.

Gráfico 9 - Grupo A: Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável forma das aberturas

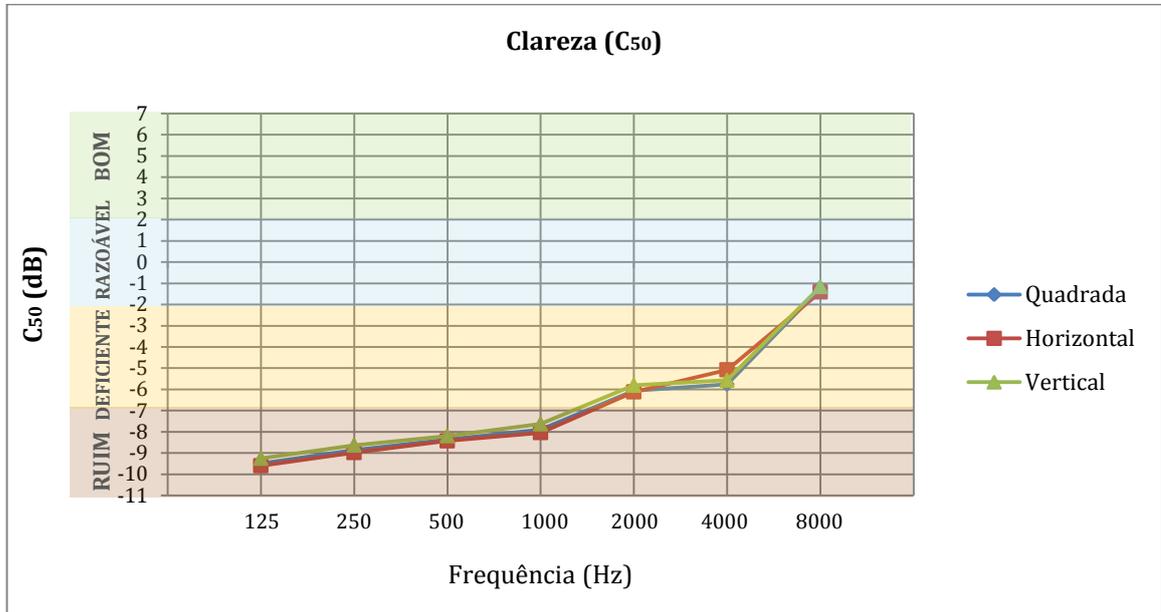


Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

Quanto à **Clareza (C_{50})**, através do Gráfico 10, é possível observar a variação dos valores de maneira discreta devido à mudança da forma das aberturas. Considerando a frequência de 500Hz, a variação máxima de C_{50} entre os arranjos corresponde a

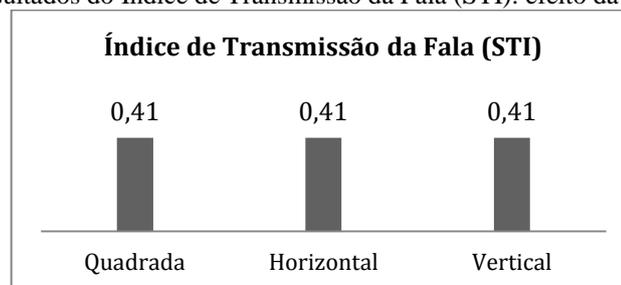
aproximadamente 3%. Na frequência de 2000Hz, nota-se uma maior diferença nos resultados, com variação máxima em torno de 5%.

Gráfico 10 - Grupo A: Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável forma das aberturas



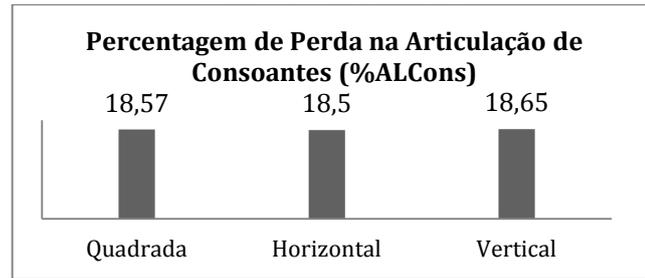
Em relação ao **Índice de Transmissão da Fala (STI)**, os resultados das três configurações foram iguais, de 0,41, conforme apresentados no Gráfico 11.

Gráfico 11 - Grupo A: Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável forma das aberturas



Os valores de **Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)**, apresentaram variação muito pequena entre os arranjos simulados, com %ALCons correspondentes entre 18,5% a 18,65%, o que totaliza a menos de 1% de variação entre os arranjos (Gráfico 12).

Gráfico 12 - Grupo A: Resultados da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável forma das aberturas



Apesar da discreta variação dos resultados dos parâmetros acústicos, é possível identificar os arranjos mais favoráveis. Ao considerar o C_{50} , o arranjo composto de uma janela vertical (modelo A10-1C-V) apresentou os melhores resultados críticos. Em se tratando do %ALCons, o arranjo composto de uma janela horizontal (modelo A10-1C-H) alcançou os resultados críticos ligeiramente mais favoráveis.

b) Grupo B

Com o intuito de averiguar com maior ênfase o efeito da forma das aberturas na qualidade acústica da sala de aula, optou-se em avaliar mais um conjunto de arranjos, com proporções entre largura e altura mais acentuadas, ou seja, mais alongadas, comparando-se com os do Grupo A.

O segundo conjunto de arranjos também consiste nas aberturas com dimensão de 10% em relação à área de piso, porém, possui três janelas, sendo duas janelas dispostas lateralmente à parede e uma janela central (Quadro 8).

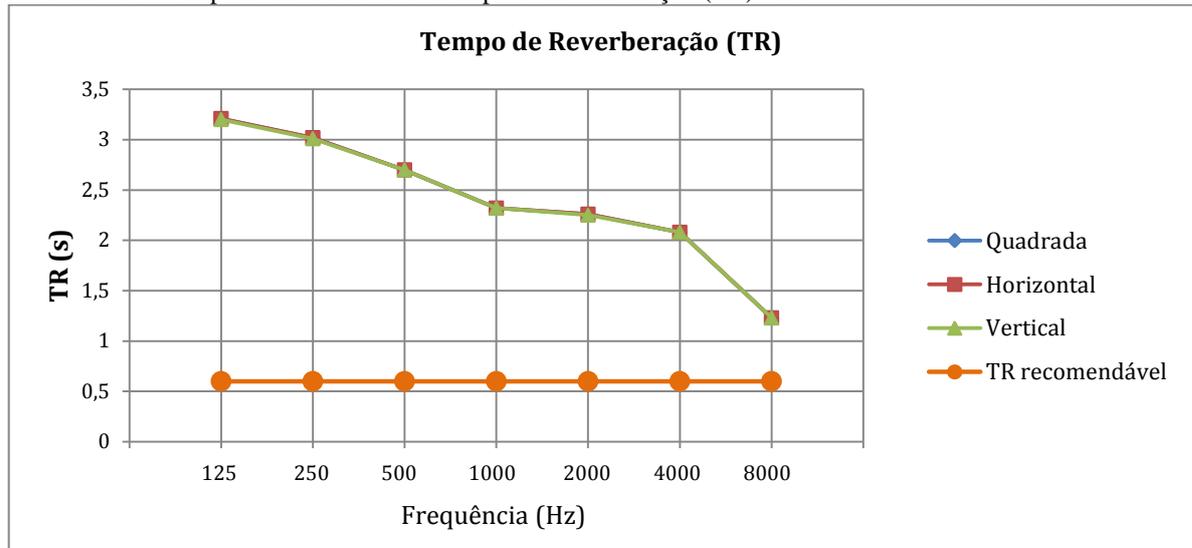
Quadro 8 - Grupo B das aberturas avaliadas segundo a variável forma

DIMENSÃO: 10%			
LOCALIZAÇÃO: 2 Laterais + Central			
FORMA	Quadrada	Horizontal	Vertical
REPRESENTAÇÃO			
MODELO	A10-2L1C-Q	A10-2L1C-H	A10-2L1C-V

Tempo de Reverberação (TR)

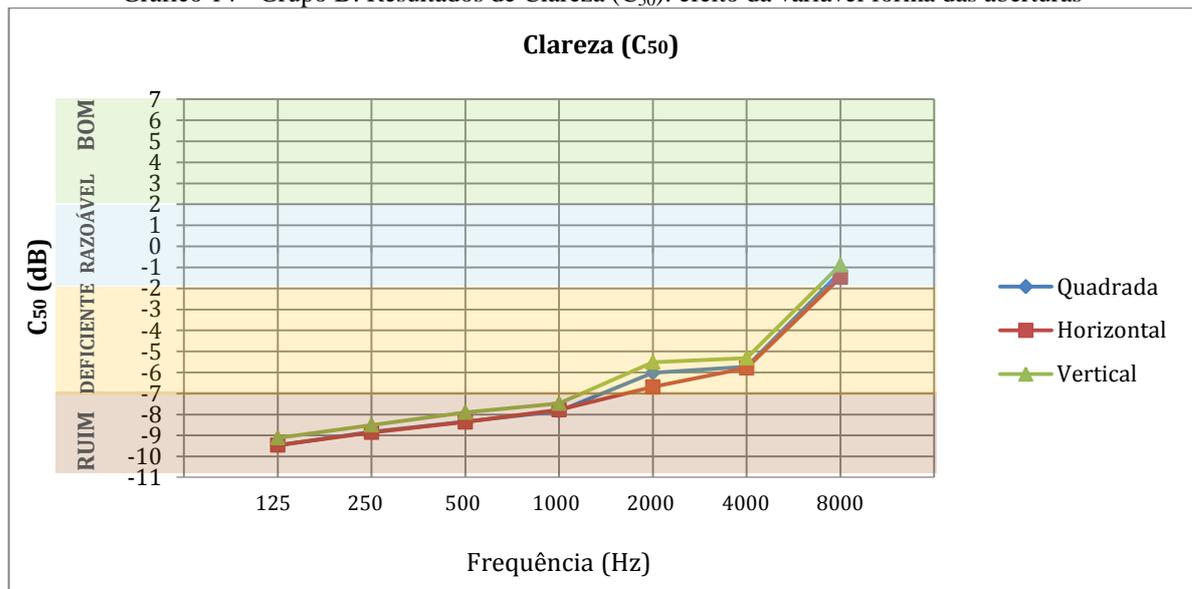
Os resultados do Tempo de Reverberação (TR) da sala de aula foram iguais para todos os arranjos, conforme apresentado no Gráfico 13. Além disso, os valores de TR do Grupo B foram similares aos valores do Grupo A.

Gráfico 13 - Grupo B: Resultados do Tempo de Reverberação (TR): efeito da variável forma das aberturas



Clareza (C_{50}), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

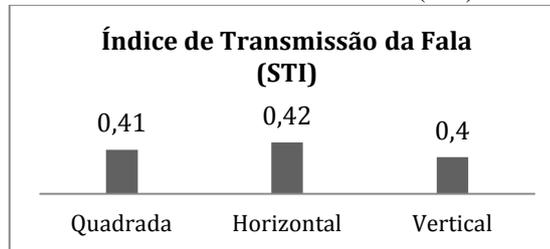
Os resultados de **Clareza (C_{50})** referentes aos arranjos simulados sofreram mudanças discretas de valores com a mudança da forma das aberturas (Gráfico 14), com variação máxima em torno de 6%, em se tratando da frequência de 500Hz. No entanto, as maiores diferenças nos resultados são encontradas na frequência de 2000Hz, com variação máxima de aproximadamente 21%.

Gráfico 14 - Grupo B: Resultados de Clareza (C_{50}): efeito da variável forma das aberturas

Quanto ao **Índice de Transmissão da Fala (STI)**, os valores das três configurações apresentaram diferenças sutis, com variação máxima entre os resultados por volta de 5%. A

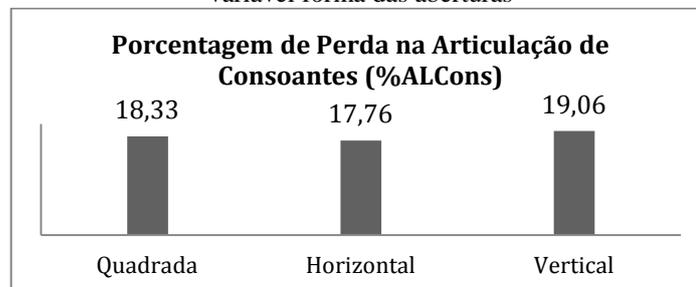
sala de aula com arranjo de aberturas horizontais apresentou o melhor resultado de STI, de 0,42, enquanto a sala de aula com arranjo de aberturas verticais obteve STI de 0,40, resultado mais desfavorável (Gráfico 15).

Gráfico 15 - Grupo B: Resultados do Índice de Transmissão da Fala (STI): efeito da variável forma das aberturas



De acordo com o Gráfico 16, verifica-se que os valores de **Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)** apresentaram variação discreta entre os arranjos simulados. Assim como os resultados de STI, a sala de aula com arranjo de aberturas horizontais apresentou o melhor resultado entre os três arranjos analisados, com %ALCons resultante de 17,76%, enquanto a sala de aula com arranjo de aberturas verticais apresentou o pior resultado, com %ALCons de 19,06%. Portanto, a variação máxima dos valores críticos entre os arranjos correspondeu em torno de 7%.

Gráfico 16 - Grupo B: Resultados do Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons): efeito da variável forma das aberturas



Do mesmo modo que no Grupo A, apesar da discreta variação dos resultados críticos dos parâmetros acústicos, os arranjos indicados como mais favoráveis são: ao considerar o C_{50} (500Hz), o arranjo composto de uma janela vertical (modelo A10-2L1C-V) apresentou os melhores resultados; enquanto que ao considerar o %ALCons, o arranjo composto de uma janela horizontal (modelo A10-2L1C-H) alcançou os resultados ligeiramente mais favoráveis.

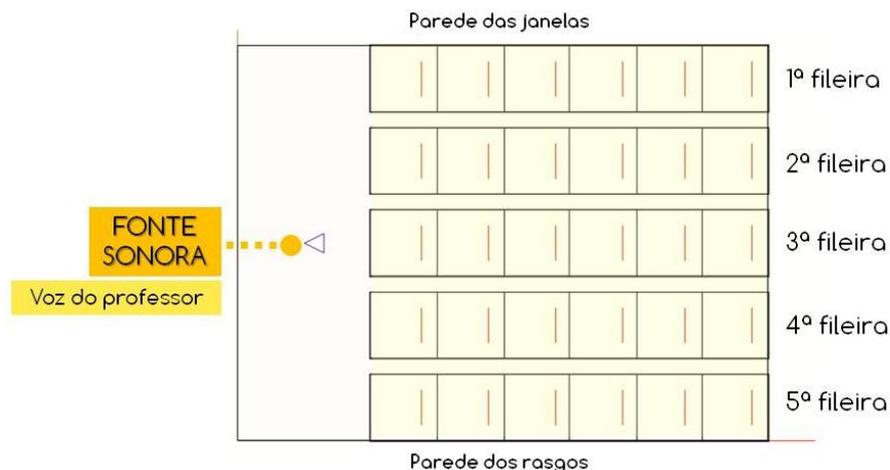
Embora os valores críticos de C_{50} , STI e %ALCons tenham apresentado pouca variação entre os arranjos simulados, verifica-se que com a alteração da forma das aberturas, os resultados dos parâmetros acústicos apresentam modificações por assento, de maneira que a forma das aberturas influencia nos resultados em relação à distribuição espacial, conforme

será discutido na seção 3.3 *Distribuição espacial dos resultados dos parâmetros acústicos nas salas de aula*. Ressalta-se que todas as análises realizadas nesta seção foram baseadas nos valores dos parâmetros acústicos no assento mais crítico.

3.3 DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS RESULTADOS DOS PARÂMETROS ACÚSTICOS NAS SALAS DE AULA

A avaliação da distribuição espacial dos resultados dos parâmetros foi auxiliada pela observação dos mapas acústicos dos arranjos (modelos) simulados. Para subsidiar as discussões, considerou-se a disposição dos assentos de acordo com a ocupação da sala de aula por parte dos usuários, representados pelos quadrados, apresentados na Figura 42. A fonte sonora, que consiste na voz do professor, é representada pelo triângulo disposto de forma centralizada em relação à largura da sala, à frente dos assentos.

Figura 42 - Modelo de sala de aula em planta-baixa, com a representação da fonte sonora e assentos/área de audiência.



3.3.1 Influência da Dimensão das Aberturas na Distribuição Espacial dos Resultados

Clareza (C_{50})

O Quadro 9 expõe os mapas acústicos e os gráficos de frequência de distribuição referentes ao parâmetro Clareza (C_{50}) dos arranjos avaliados em função da dimensão das aberturas.

Conforme discutido na seção 3.2.1 *Influência da Dimensão das Aberturas*, o aumento do percentual de área de abertura introduz melhorias nos parâmetros avaliados.

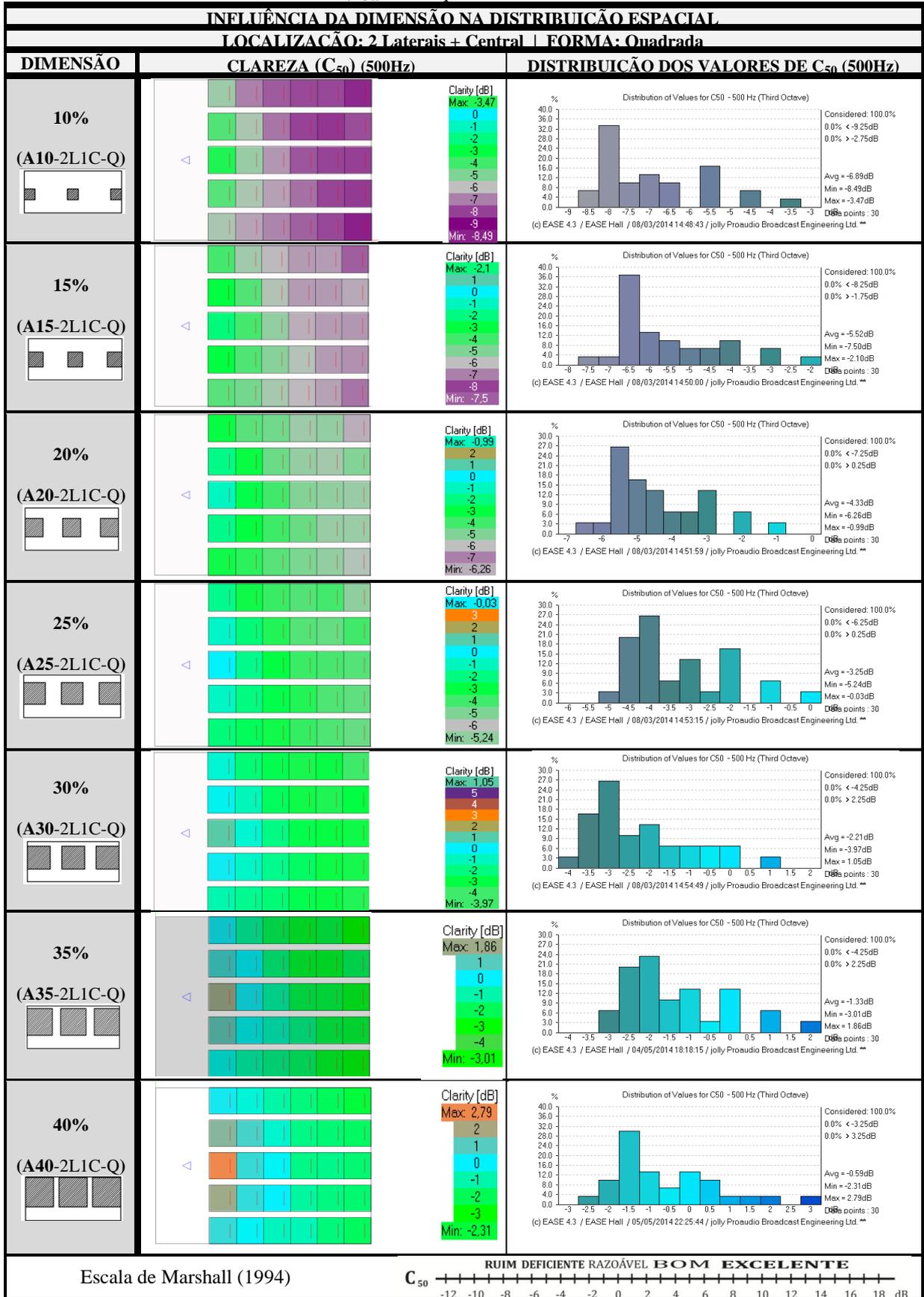
Para a situação com área de abertura de 10% em relação à área de piso, os valores associados ao C_{50} (frequência de 500Hz) variaram entre -8,49dB (valor mais crítico) e -

3,47dB (melhor valor encontrado), classificados entre ruim e deficiente, de acordo com a escala de Marshall (1994). Observa-se que os valores mais críticos ocorrem nas extremidades (fundo e laterais da sala).

À medida que o percentual de área de abertura aumenta, os valores de C_{50} (frequência de 500Hz) tendem a obter resultados mais favoráveis, principalmente, nos assentos próximos à fonte sonora (voz do professor). Por exemplo, para o arranjo com percentual de abertura de 40%, os valores de C_{50} atingem a marca de 2,79dB (frequência de 500Hz), em um dos assentos, classificado como bom, segundo a escala de Marshall (1994). Entretanto, nesse mesmo arranjo (40% de área de abertura), os valores de C_{50} (frequência de 500Hz) podem chegar a -2,31dB nos assentos localizados no fundo da sala, o que pode ser considerado como deficiente, de acordo com a escala de classificação de Marshall (1994).

Nota-se que a partir dos arranjos com configuração de 20% de área de abertura em relação à área de piso (modelo A20-2L1C-Q), os valores de C_{50} nos assentos apresentam uma maior uniformidade em relação à distribuição na sala de aula. Enquanto nos arranjos de 10% (modelo A10-2L1C-Q) e 15% (modelo A15-2L1C-Q), principalmente, há a tendência dos assentos localizados próximos às janelas apresentarem resultados mais críticos.

Quadro 9 - Mapas acústicos: efeito da variável de dimensão das aberturas na disposição espacial de Clareza (C_{50}), na frequência de 500Hz



Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

A distribuição espacial do **Índice de Transmissão da Fala (STI)** é apresentado no Quadro 10 e evidencia uma baixa amplitude (variação de valores) entre assentos próximos à fonte sonora (STI = 0,48) e a maior parte dos assentos situados nas extremidades da sala (STI = 0,40), na configuração com 10% de área de abertura (modelo A10-2L1C-Q). Ressalta-se que o menor valor de STI, e portanto, o mais crítico, é observado no primeiro assento da primeira fileira. À medida que o percentual de área de abertura aumenta, a dispersão dos valores de STI tende a diminuir, no entanto, mantém-se a mesma amplitude.

Para o modelo com 40% de área de abertura (modelo A40-2L1C-Q), os valores de STI nos assentos próximos à fonte sonora assumem valores classificados como bons (STI = 0,67), de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011)¹⁶, enquanto que no terceiro assento da primeira fileira, o valor de STI corresponde a 0,58, classificado como razoável, segundo a presente norma.

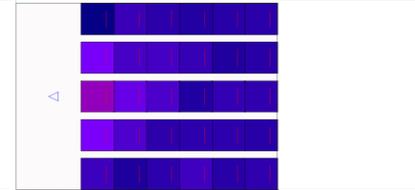
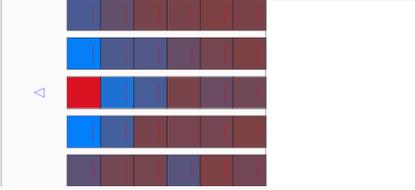
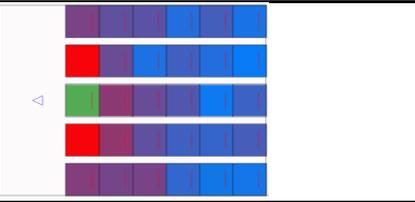
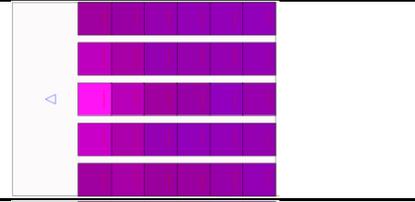
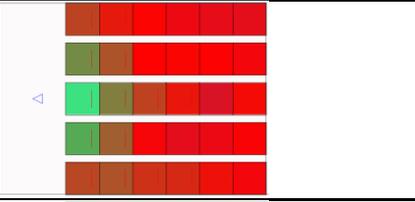
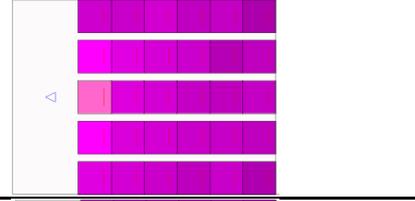
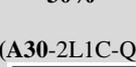
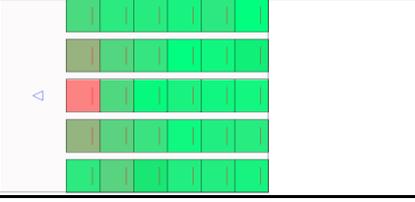
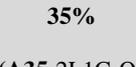
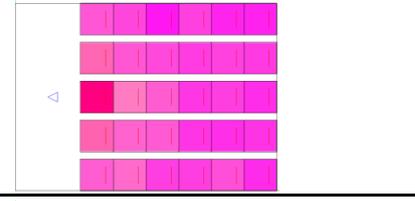
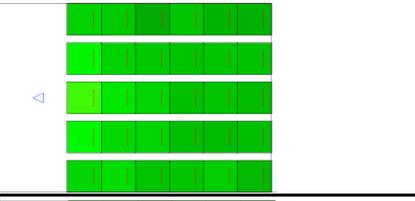
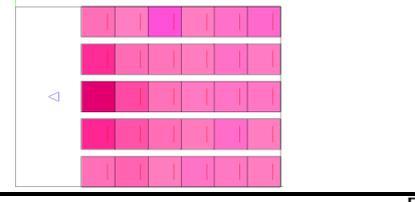
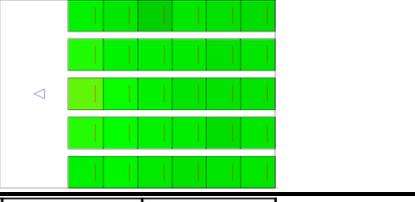
A **Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)**, na configuração com 10% de abertura (modelo A10-2L1C-Q) apresenta a situação mais favorável no assento próximo à fonte, com valor de %ALCons de 12,42%, considerado razoável de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011). No primeiro assento da primeira fileira verifica-se o valor mais crítico, que corresponde a %ALCons de 19,28%, classificado como ruim, conforme a referida norma.

Para a configuração com 40% de área de abertura (modelo A40-2L1C-Q), os valores de %ALCons corresponderam a 4,51% no assento mais favorável e 7,31% no assento mais crítico, obtendo as classificações como bom e razoável, respectivamente, segundo a norma IEC 60268-16 (2011).

Os gráficos de frequência de distribuição dos parâmetros STI e %ALCons referentes aos arranjos avaliados em função da variável dimensão encontram-se no Apêndice E.

¹⁶ IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011).

Quadro 10 - Mapas acústicos: efeito da variável de dimensão das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

INFLUÊNCIA DA DIMENSÃO NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL																					
LOCALIZAÇÃO: 2 Laterais + Central																					
FORMA: Quadrada																					
DIMENSÃO	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)	PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)																			
<p>10%</p> <p>(A10-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,4 4 41 42 43 44 45 46 47 48 49 Max: 0,48</p>	 <p>ALCons [%] Max: 19,28 21 14 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,42</p>																			
<p>15%</p> <p>(A15-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,44 .44 .45 .46 .47 .48 .49 .5 .51 .52 .53 Max: 0,52</p>	 <p>ALCons [%] Max: 15,4 18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 Min: 9,98</p>																			
<p>20%</p> <p>(A20-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,48 47 48 49 .5 .51 .52 .53 .54 .55 .56 Max: 0,56</p>	 <p>ALCons [%] Max: 12,45 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 Min: 8,3</p>																			
<p>25%</p> <p>(A25-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,51 51 52 53 54 55 56 57 58 59 .6 Max: 0,59</p>	 <p>ALCons [%] Max: 10,88 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 Min: 6,96</p>																			
<p>30%</p> <p>(A30-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,54 54 55 56 57 58 59 .6 .61 .62 .63 Max: 0,62</p>	 <p>ALCons [%] Max: 9,23 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 Min: 5,91</p>																			
<p>35%</p> <p>(A35-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,57 56 57 58 59 .6 .61 .62 .63 .64 .65 Max: 0,65</p>	 <p>ALCons [%] Max: 8,24 13 12 11 10 9 8 7 6 5 Min: 5,04</p>																			
<p>40%</p> <p>(A40-2L1C-Q)</p> 	 <p>STI Min: 0,58 58 59 .6 .61 .62 .63 .64 .65 .66 .67 .68 Max: 0,68</p>	 <p>ALCons [%] Max: 7,31 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 Min: 4,51</p>																			
<p>Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011):</p>		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo de valores de STI</th> <th>Intervalo de valores de %ALCons</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.75 - 1</td> <td>0 - 3%</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>0.6 - 0.75</td> <td>3% - 7%</td> <td>Bom</td> </tr> <tr> <td>0.45 - 0.6</td> <td>7% - 15%</td> <td>Razoável</td> </tr> <tr> <td>0.3 - 0.45</td> <td>15% - 33%</td> <td>Ruim</td> </tr> <tr> <td>0 - 0.3</td> <td>33% - 100%</td> <td>Inaceitável</td> </tr> </tbody> </table>	Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALCons	Classificação	0.75 - 1	0 - 3%	Excelente	0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom	0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável	0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim	0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável	
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALCons	Classificação																			
0.75 - 1	0 - 3%	Excelente																			
0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom																			
0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável																			
0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim																			
0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável																			

3.3.2 Influência da Localização das Aberturas na Distribuição Espacial dos Resultados

Clareza (C_{50})

O Quadro 11 contém os mapas acústicos relativos ao parâmetro Clareza (C_{50}) dos arranjos avaliados em função da localização das aberturas, além dos gráficos de frequência de distribuição. Nos mapas acústicos, as linhas na cor preta representam a localização das janelas em planta-baixa.

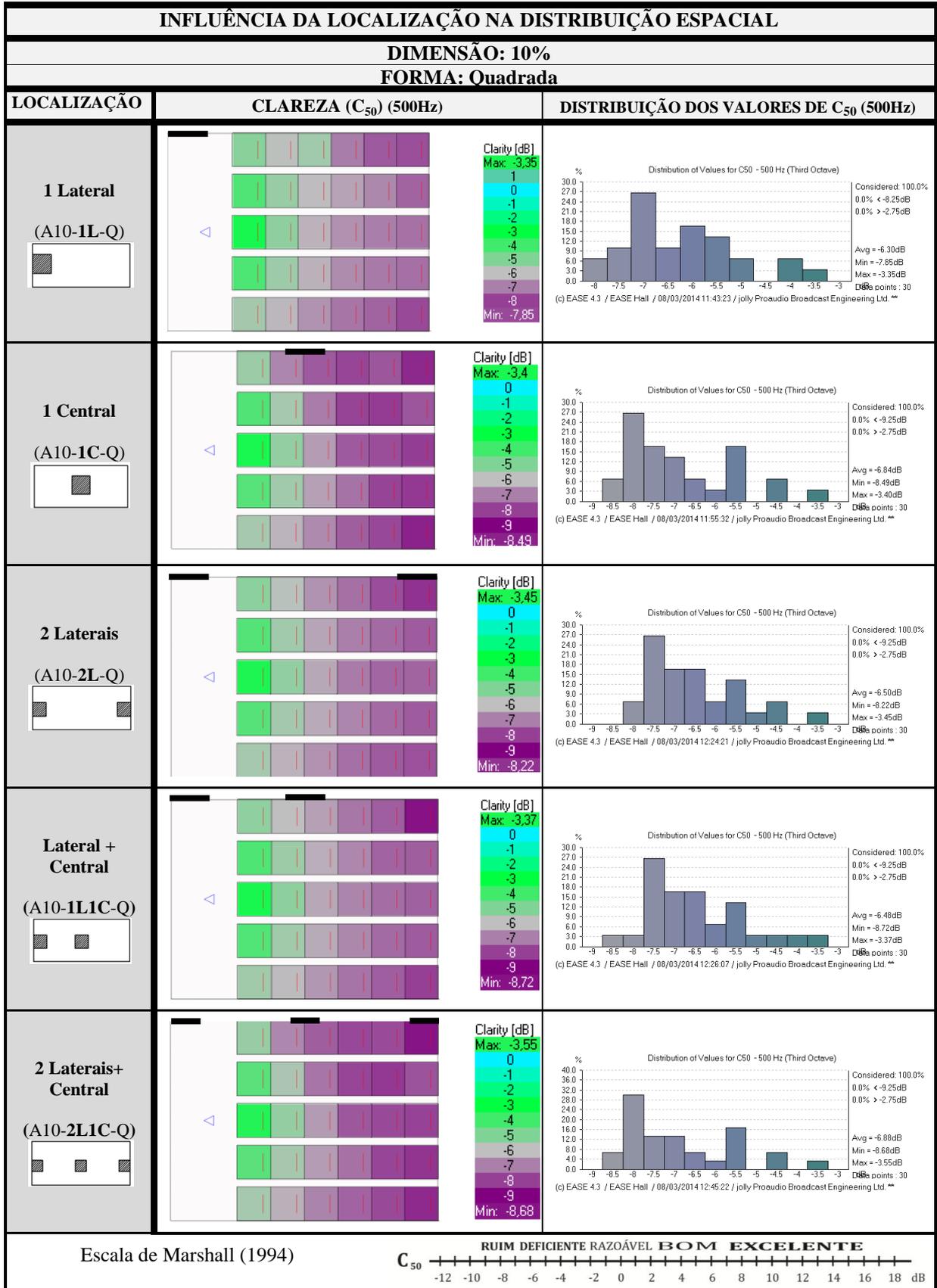
Ao comparar os resultados obtidos entre as configurações com uma janela lateral (modelo A10-1L-Q) e uma janela central (modelo A10-1C-Q), observa-se que pelo fato do deslocamento da janela da parte lateral para a central da parede, houve um pequeno prejuízo nos valores de C_{50} , uma vez que nos assentos mais críticos, nos dois referidos arranjos, respectivamente, os valores decaíram de -7,85dB para -8,49dB B (na frequência de 500Hz), totalizando uma perda de cerca de 8%. Além disso, observa-se uma perda global na qualidade acústica da sala, visto que na maior parte dos assentos, detectou-se valores de C_{50} menores que do arranjo com 1 janela lateral (modelo A10-1L-Q), também com perda média de qualidade por volta de 8%. O deslocamento da janela para a parte central da parede acarretou em valores de C_{50} menos favoráveis nos assentos próximos à janela. Porém, no assento mais favorável, a perda de qualidade foi insignificante, menor que 1,5%.

Em relação aos modelos compostos de duas janelas cada, modelos A10-2L-Q e A10-1L1C-Q, observa-se que o fato das aberturas se localizarem mais próximas à fonte sonora (modelo A10-1L1C-Q) implica em uma sutil melhoria na distribuição do parâmetro C_{50} nos assentos, com valor médio passando de -6,5dB para -6,48dB (na frequência de 500Hz), além disso, houve um aumento do número de assentos com resultados discretamente melhores. Entretanto, vale ressaltar que houve perda de qualidade no assento mais crítico, localizado em ambos os arranjos, na última posição da primeira fileira.

Quanto ao arranjo composto de três janelas, modelo A10-2L1C-Q, notou-se uma maior dispersão nos resultados de C_{50} por assento, onde a maior parte dos assentos apresentou nível de valores ligeiramente inferiores, portanto, menos favoráveis, aos demais arranjos, com média de C_{50} de -6,88dB (na frequência de 500Hz).

Por meio das simulações, foram verificadas uma ligeira tendência de melhoria dos valores de C_{50} nos assentos em configurações com janelas localizadas mais próximas à fonte sonora, com a ocorrência de uma distribuição espacial mais uniforme dos resultados.

Quadro 11 - Mapas acústicos: efeito da variável de localização das aberturas na disposição espacial de Clareza (C_{50}), na frequência de 500Hz



Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

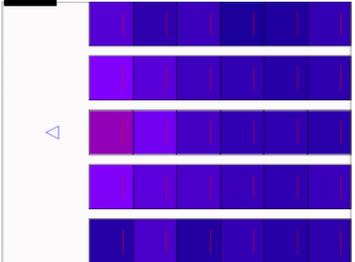
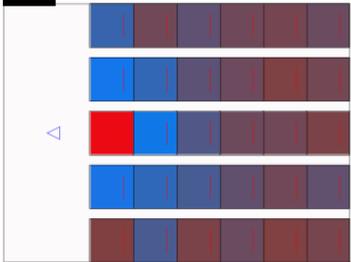
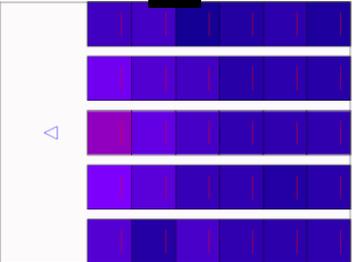
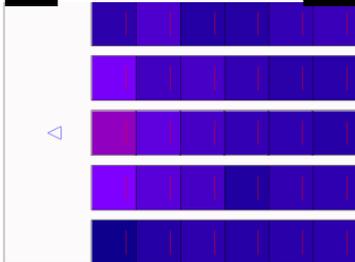
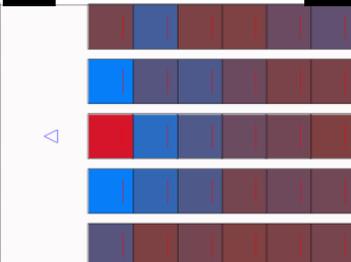
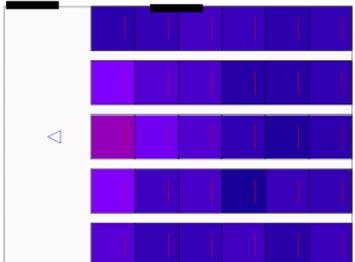
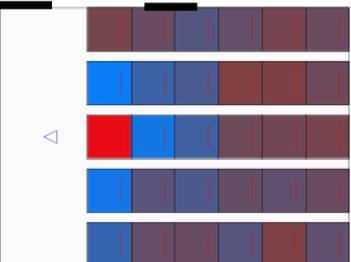
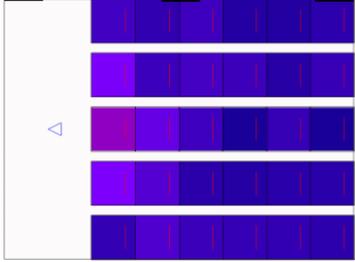
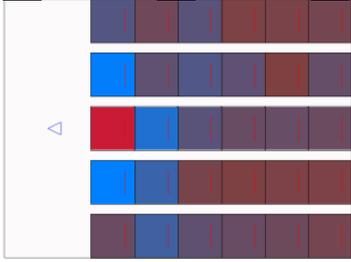
No Quadro 12, encontram-se os mapas acústicos referentes aos parâmetros STI e %ALCons dos arranjos simulados de acordo com a variável localização das aberturas. Nos mapas acústicos, as linhas na cor preta representam a localização das janelas em planta-baixa.

Os resultados das simulações mostram que as variações dos valores do **Índice de Transmissão da Fala (STI)** são classificados entre razoável (nos assentos mais favoráveis) a ruim (nos assentos menos favoráveis), segundo a norma IEC 60268-16 (2011)¹⁷. Comportamento similar ocorre em relação aos resultados do **Porcentagem de Perda de Articulação de Consoantes (%ALCons)**, com ocorrência de resultados classificados entre razoável (nos assentos mais favoráveis) a ruim (nos assentos menos favoráveis). De forma análoga ao parâmetro C_{50} , os resultados indicam que valores de STI e %ALCons ligeiramente melhores são encontrados nas disposições onde as aberturas se distribuem mais próximas da fonte sonora, a exemplo do modelo composto de uma janela lateral (modelo A10-1L-Q) e do modelo composto de uma janela lateral e uma janela central (modelo A10-1L1C-Q), com a obtenção de melhores valores médios.

Os gráficos de frequência de distribuição dos parâmetros STI e %ALCons relativos aos arranjos avaliados em função da variável localização encontram-se no Apêndice F.

¹⁷ IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011).

Quadro 12 - Mapas acústicos: efeito da variável de localização das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

INFLUÊNCIA DA LOCALIZAÇÃO NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL																				
DIMENSÃO: 10%																				
FORMA: Quadrada																				
LOCALIZAÇÃO	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)	PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)																		
1 Lateral (A10-1L-Q) 	 <p>STI Min: 0.41 Max: 0.49</p>	 <p>ALCons [%] Max: 18.4 Min: 12.23</p>																		
1 Central (A10-1C-Q) 	 <p>STI Min: 0.41 Max: 0.48</p>	 <p>ALCons [%] Max: 18.66 Min: 12.53</p>																		
2 Laterais (A10-2L-Q) 	 <p>STI Min: 0.41 Max: 0.48</p>	 <p>ALCons [%] Max: 18.97 Min: 12.5</p>																		
Lateral + Central (A10-1L1C-Q) 	 <p>STI Min: 0.41 Max: 0.49</p>	 <p>ALCons [%] Max: 18.6 Min: 12.26</p>																		
2 Laterais+ Central (A10-2L1C-Q) 	 <p>STI Min: 0.41 Max: 0.48</p>	 <p>ALCons [%] Max: 18.58 Min: 12.64</p>																		
Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011):		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo de valores de STI</th> <th>Intervalo de valores de %ALcons</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.75 - 1</td> <td>0 - 3%</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>0.6 - 0.75</td> <td>3% - 7%</td> <td>Bom</td> </tr> <tr> <td>0.45 - 0.6</td> <td>7% - 15%</td> <td>Razoável</td> </tr> <tr> <td>0.3 - 0.45</td> <td>15% - 33%</td> <td>Ruim</td> </tr> <tr> <td>0 - 0.3</td> <td>33% - 100%</td> <td>Inaceitável</td> </tr> </tbody> </table>	Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação	0.75 - 1	0 - 3%	Excelente	0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom	0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável	0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim	0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação																		
0.75 - 1	0 - 3%	Excelente																		
0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom																		
0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável																		
0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim																		
0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável																		

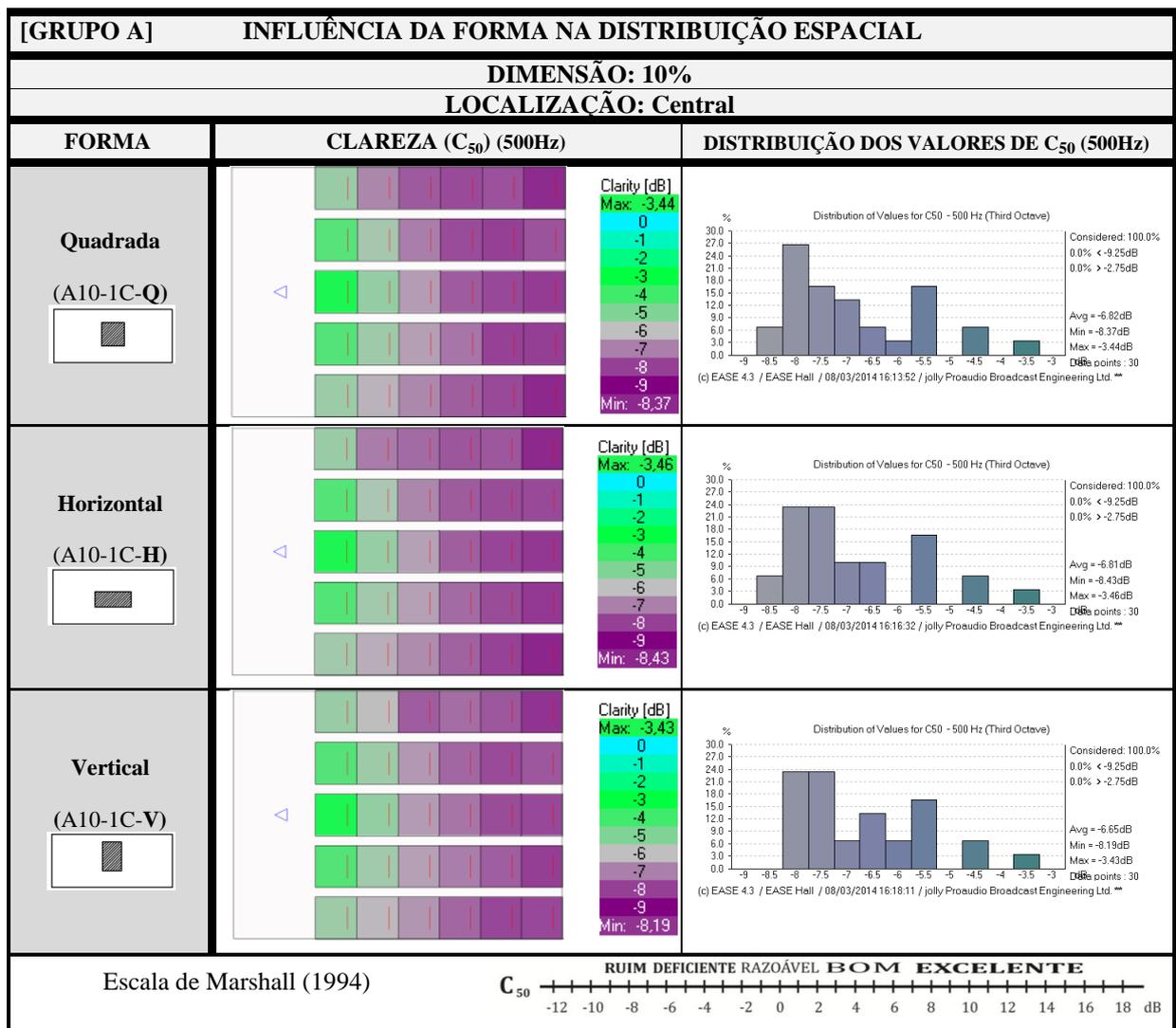
3.3.3 Influência da Forma das Aberturas na Distribuição Espacial dos Resultados

Conforme apresentado anteriormente, para o estudo da influência da variável forma, foram selecionados dois grupos de arranjos de aberturas para simulação, chamados de Grupo A e Grupo B, compostos de janelas quadradas, horizontais e verticais.

Clareza (C₅₀)

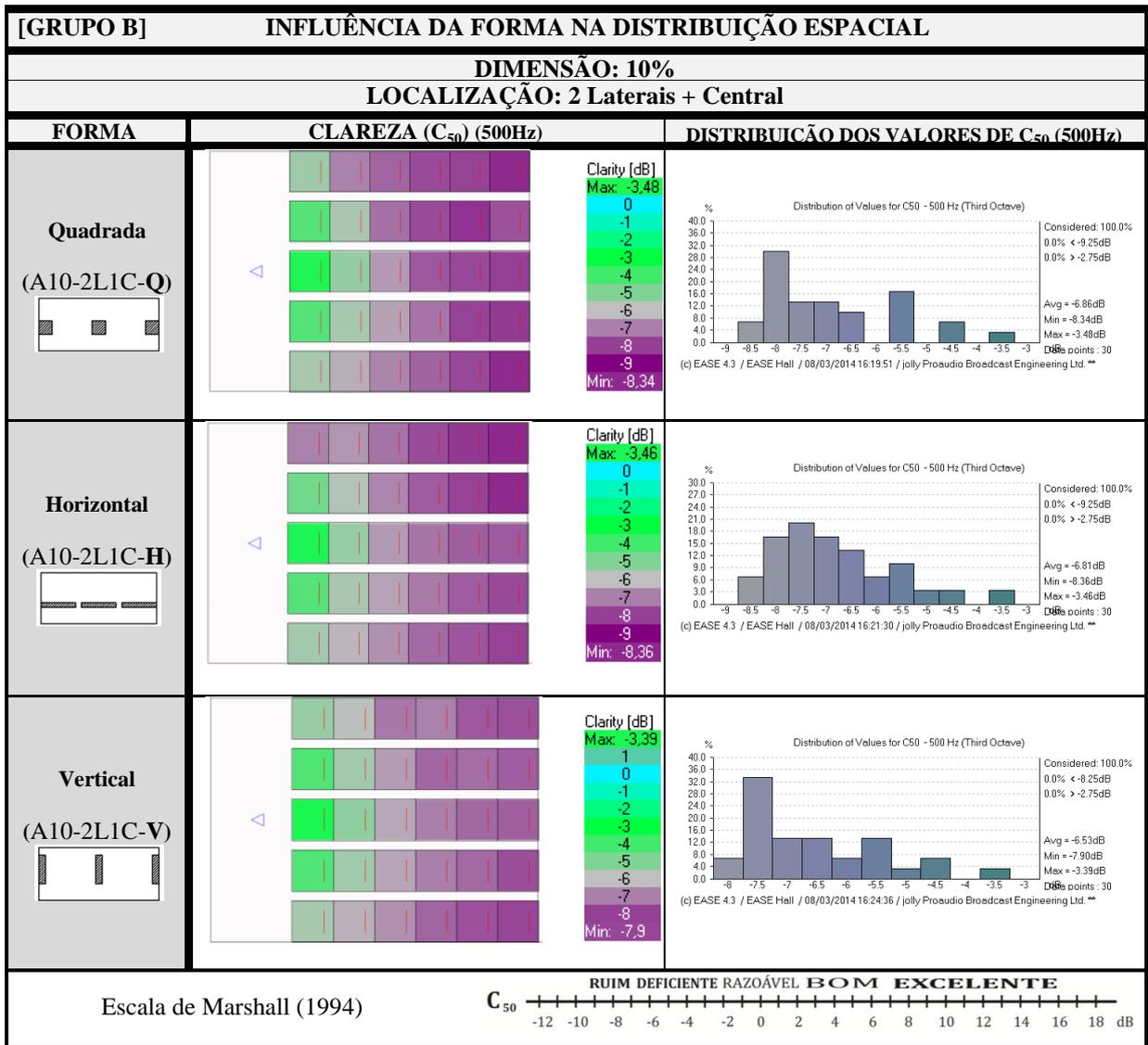
No que se refere ao **Grupo A**, por meio dos mapas acústicos e dos gráficos de frequência de distribuição apresentados no Quadro 13, é possível observar que a diferença entre os resultados de C₅₀ (frequência de 500Hz) entre os arranjos é sutil, no entanto, verifica-se que no modelo composto pela janela vertical (modelo A10-1C-V) apresenta os melhores resultados médios, de -6,65dB (frequência de 500Hz), o representa uma melhoria de apenas 2,6% em relação ao arranjo menos favorável (janela quadrada, modelo A10-1C-Q).

Quadro 13 - [GRUPO A] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial da Clareza (C₅₀) (na frequência de 500Hz)



O comportamento da distribuição espacial de C_{50} (frequência de 500Hz) dos arranjos do **Grupo B** foram similares aos obtido no Grupo A. No Quadro 14, pode-se observar que a configuração com janela vertical (A10-2L1C-V) apresenta valores ligeiramente superiores, com valor médio de parâmetro C_{50} de -6,53dB (frequência de 500Hz), representando um ganho aproximado de 5% em relação ao arranjo de configuração menos favorável (janela quadrada, modelo A10-2L1C-Q).

Quadro 14 - [GRUPO B] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial da Clareza (C_{50}) (na frequência de 500Hz)

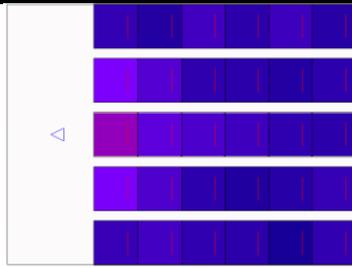
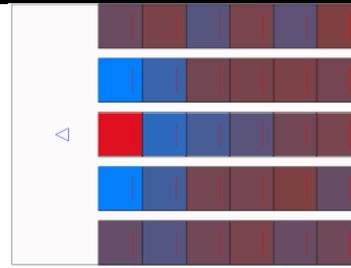
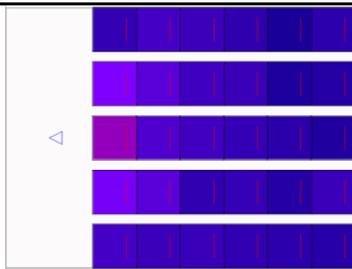
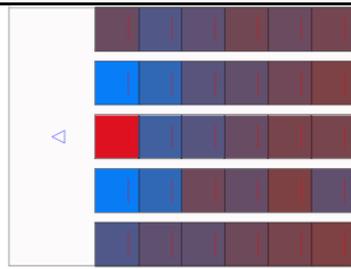
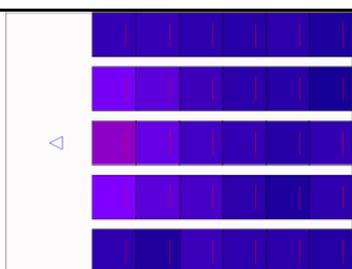
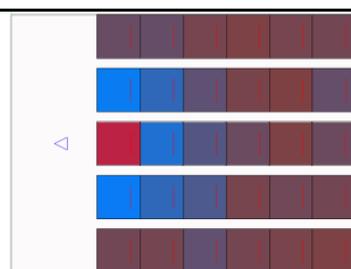


Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

Os mapas acústicos e os gráficos de frequência de distribuição referentes à avaliação da variável forma das aberturas do **Grupo A**, organizados no Quadro 15, apresentaram

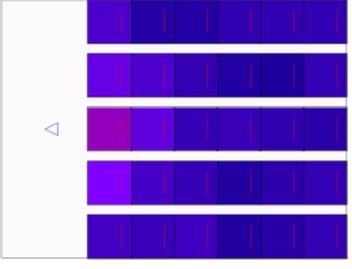
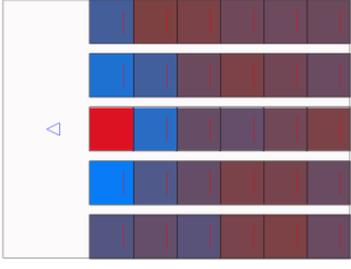
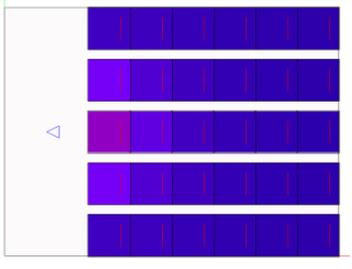
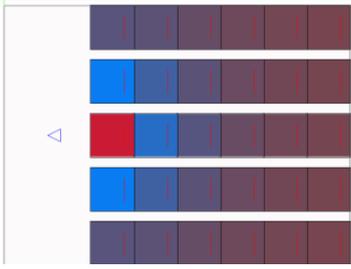
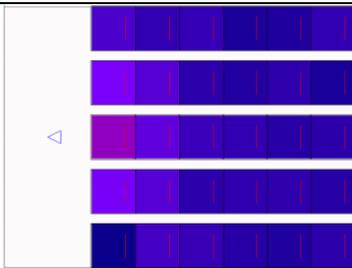
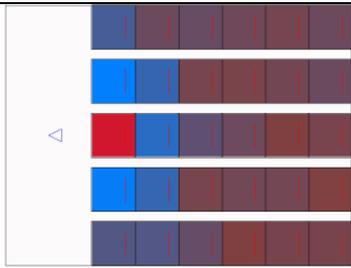
resultados praticamente iguais de STI nos três modelos, com variação máxima de 0,23% dos valores médios do parâmetro acústico. Tal comportamento também foi verificado nos resultados de %ALCons, com variação máxima de 0,64% entre os arranjos.

Quadro 15 - [GRUPO A] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

[GRUPO A] INFLUÊNCIA DA FORMA NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL																					
DIMENSÃO: 10%																					
LOCALIZAÇÃO: Central																					
FORMA	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)		PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)																		
Quadrada (A10-1C-Q) 		STI Min: 0,41 .4 .41 .42 .43 .44 .45 .46 .47 .48 .49 Max: 0,48	 ALCons [%] Max: 18,57 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,38																		
Horizontal (A10-1C-H) 		STI Min: 0,41 .4 .41 .42 .43 .44 .45 .46 .47 .48 .49 Max: 0,48	 ALCons [%] Max: 18,5 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,39																		
Vertical (A10-1C-V) 		STI Min: 0,41 .39 .4 .41 .42 .43 .44 .45 .46 .47 .48 Max: 0,48	 ALCons [%] Max: 18,65 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,79																		
Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011):		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo de valores de STI</th> <th>Intervalo de valores de %ALCons</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,75 - 1</td> <td>0 - 3%</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>0,6 - 0,75</td> <td>3% - 7%</td> <td>Bom</td> </tr> <tr> <td>0,45 - 0,6</td> <td>7% - 15%</td> <td>Razoável</td> </tr> <tr> <td>0,3 - 0,45</td> <td>15% - 33%</td> <td>Ruim</td> </tr> <tr> <td>0 - 0,3</td> <td>33% - 100%</td> <td>Inaceitável</td> </tr> </tbody> </table>	Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALCons	Classificação	0,75 - 1	0 - 3%	Excelente	0,6 - 0,75	3% - 7%	Bom	0,45 - 0,6	7% - 15%	Razoável	0,3 - 0,45	15% - 33%	Ruim	0 - 0,3	33% - 100%	Inaceitável	
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALCons	Classificação																			
0,75 - 1	0 - 3%	Excelente																			
0,6 - 0,75	3% - 7%	Bom																			
0,45 - 0,6	7% - 15%	Razoável																			
0,3 - 0,45	15% - 33%	Ruim																			
0 - 0,3	33% - 100%	Inaceitável																			

Para análise dos mapas acústicos das configurações de abertura das janelas do Grupo B, indicados no Quadro 16, observou-se que de maneira similar ao verificado no Grupo A, os resultados do STI e %ALCons foram praticamente iguais nos três arranjos, com uma pequena vantagem de menos de 0,5% para a configuração de janela vertical (modelo A10-2L1C-V).

Quadro 16 - [GRUPO B] Mapas acústicos: efeito da variável forma das aberturas na disposição espacial do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

[GRUPO B] INFLUÊNCIA DA FORMA NA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL																					
DIMENSÃO: 10%																					
LOCALIZAÇÃO: 2 Laterais + Central																					
FORMA	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)	PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)																			
Quadrada (A10-2L1C-Q) 	 STI Min: 0,41 .4 .41 .42 .43 .44 .45 .46 .47 .48 .49 Max: 0,48	 ALCons [%] Max: 18,33 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,41																			
Horizontal (A10-2L1C-H) 	 STI Min: 0,42 .4 .41 .42 .43 .44 .45 .46 .47 .48 .49 Max: 0,48	 ALCons [%] Max: 17,76 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,62																			
Vertical (A10-2L1C-V) 	 STI Min: 0,4 .4 .41 .42 .43 .44 .45 .46 .47 .48 .49 Max: 0,48	 ALCons [%] Max: 19,08 21 20 19 18 17 16 15 14 13 12 Min: 12,54																			
Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011):		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo de valores de STI</th> <th>Intervalo de valores de %ALcons</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,75 - 1</td> <td>0 - 3%</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>0,6 - 0,75</td> <td>3% - 7%</td> <td>Bom</td> </tr> <tr> <td>0,45 - 0,6</td> <td>7% - 15%</td> <td>Razoável</td> </tr> <tr> <td>0,3 - 0,45</td> <td>15% - 33%</td> <td>Ruim</td> </tr> <tr> <td>0 - 0,3</td> <td>33% - 100%</td> <td>Inaceitável</td> </tr> </tbody> </table>	Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação	0,75 - 1	0 - 3%	Excelente	0,6 - 0,75	3% - 7%	Bom	0,45 - 0,6	7% - 15%	Razoável	0,3 - 0,45	15% - 33%	Ruim	0 - 0,3	33% - 100%	Inaceitável	
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação																			
0,75 - 1	0 - 3%	Excelente																			
0,6 - 0,75	3% - 7%	Bom																			
0,45 - 0,6	7% - 15%	Razoável																			
0,3 - 0,45	15% - 33%	Ruim																			
0 - 0,3	33% - 100%	Inaceitável																			

Os gráficos de frequência de distribuição dos parâmetros STI e %ALCons referentes aos Grupos A e B dos arranjos avaliados em função da variável forma das aberturas, encontram-se no Apêndice G e Apêndice H.

3.4 OBTENÇÃO DE RESULTADOS RECOMENDÁVEIS DE PARÂMETROS ACÚSTICOS COM BASE NA INFLUÊNCIA DAS ABERTURAS

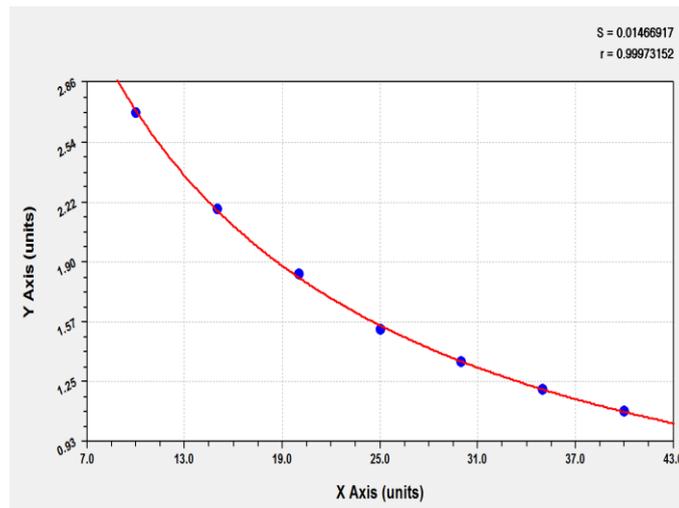
Objetivando definir possíveis configurações arquitetônicas que atendam às recomendações normativas acerca da qualidade acústica em salas de aula, optou-se

inicialmente em definições de projeto que trabalhem apenas com a influência das aberturas (janelas) nos parâmetros de qualidade acústica.

Os resultados das análises anteriores indicaram que a variável dimensão da abertura corresponde ao fator de maior potencial na correção dos parâmetros acústicos. Nesse contexto, foi realizado o ajuste de curva de tendência, a partir da correlação entre o Tempo de Reverberação (TR) e o percentual de área de abertura em relação à área de piso.

O Gráfico 17 apresenta a curva de tendência do ajuste dos dados, com o melhor grau de aproximação da correlação entre os dados do TR e percentual de área de abertura em relação à área de piso, elaborado com o auxílio do programa CurveExpert Basic (HYAMS, 2009). Observa-se através dos parâmetros estatísticos, uma excelente correlação entre os dados observados e os valores da equação ajustada.

Gráfico 17 - Curva de tendência para a correlação Tempo de Reverberação (TR) (500Hz) e percentual de área de abertura em relação à área de piso



A equação com melhor correlação corresponde à relação conhecida como “equação racional”, que assume a seguinte forma:

$$TR = \frac{1}{a + bx} \quad (\text{Equação 17})$$

Onde,

TR = Tempo de Reverberação (500Hz)

$a = 1.828611 \times 10^{-2}$

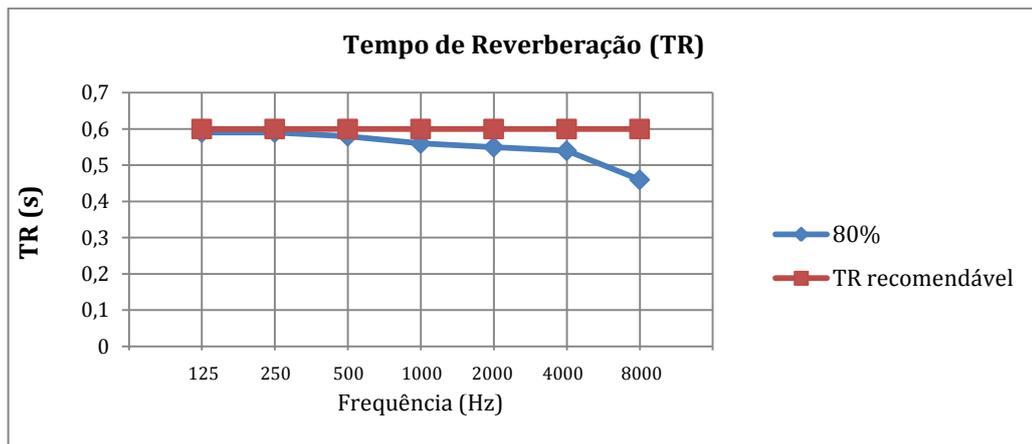
$b = 1.865925 \times 10^{-1}$

x = Percentual de abertura em relação à área de piso

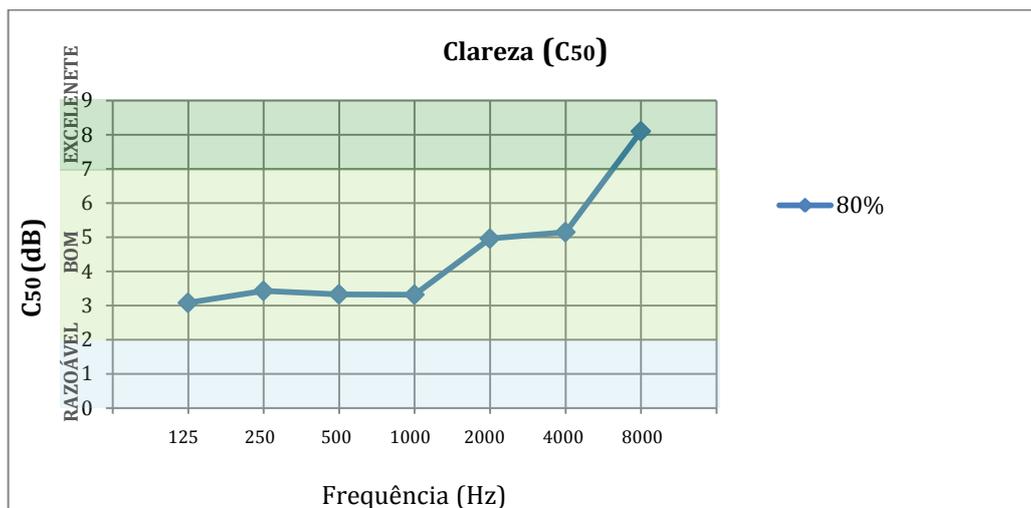
A partir da equação ajustada, quando o TR corresponde ao valor recomendado, $TR = 0,6s$ na frequência de 500Hz, de acordo com a norma ANSI S12.60: *Acoustical performance criteria, design requirements, and guidelines for schools* (2002), pode-se extrair que o percentual de abertura correspondente deve ser de aproximadamente 80%, considerando a sala de aula em estudo.

A validação do resultado, a partir de um novo modelo de sala de aula com configuração de área de abertura em relação à área de piso de 80%, simulado no Ease 4.3 (ACOUSTIC DESIGN AHNERT, 2013-b), demonstrou que os valores do TR atenderam ao valor recomendável em todas as frequências, validando, portanto, a configuração de 80% de área de abertura, conforme apresentado no gráfico a seguir.

Gráfico 18 - Tempo de Reverberação (TR) (500Hz) para sala com 80% de percentual de abertura em relação à área de piso

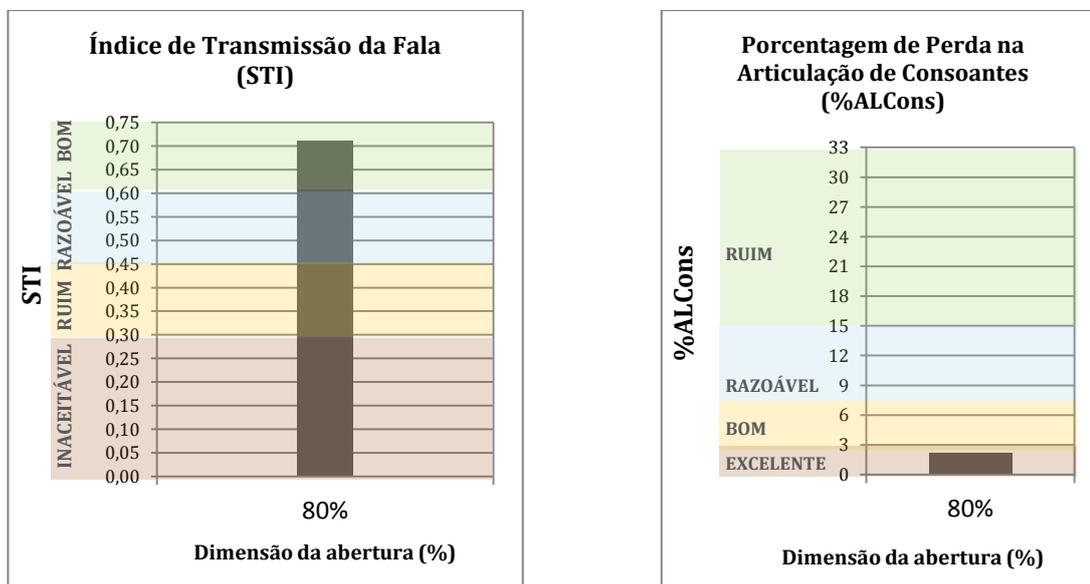


O parâmetro de Clareza (C_{50}), na frequência de 500Hz, para a sala com área de abertura de 80% em relação à área de piso também apresentou resultados favoráveis, conforme indicado no Gráfico 19, apresentando valor mínimo de 3dB, considerado bom, de acordo com a escala de classificação proposta por Marshall (1994), enquanto que a partir da frequência de 2000Hz, é considerado excelente.

Gráfico 19 - Clareza (C_{50}) (500Hz) para sala com 80% de percentual de abertura em relação à área de piso

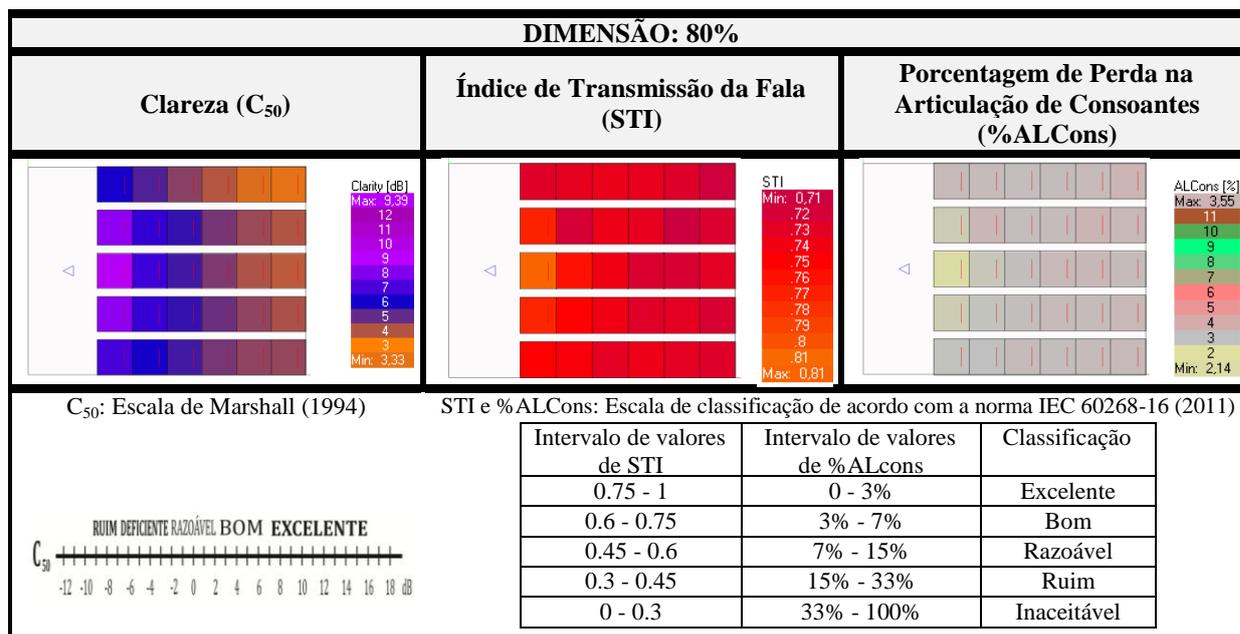
Similarmente, os resultados dos parâmetros de qualidade Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) também foram favoráveis para a configuração de sala com 80% de abertura em relação à área de piso, conforme observado no Gráfico 20.

Gráfico 20 - Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) para sala com 80% de percentual de abertura em relação à área de piso



Os mapas acústicos da situação em estudo são apresentados no Quadro 17, evidenciando que os valores dos parâmetros de qualidade acústica atenderam aos valores recomendáveis em todos os assentos da sala.

Quadro 17 - Mapas acústicos do modelo com 80% de área de abertura: (C_{50}) (500Hz), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)



Em relação à distribuição espacial dos parâmetros acústicos na sala de aula, os valores do parâmetro Clareza (C_{50}) variaram entre 3,33dB (500Hz) a 9,39dB (500Hz), sendo classificados entre bom e excelente, respectivamente, segundo a escala de classificação proposta por Marshall (1994). Foram obtidos valores do Índice de Transmissão da Fala (STI) entre 0,71 e 0,81 em todos os assentos da sala, com o alcance de classificações entre bom e excelente, de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011)¹⁸. Quanto à Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), observou-se que os resultados variaram entre 3,55% a 2,14%, valores considerados dentro dos intervalos de classificação como bom e excelente, respectivamente, conforme a norma IEC 60268-16 (2011).

Vale ressaltar que para atingir o percentual de 80% de área de abertura em relação ao piso, foi necessário considerar como vão de abertura uma área equivalente a 38,3m² de área de abertura. Embora o percentual de abertura em questão possa representar uma configuração hipotética, particularmente em situações nas quais os vãos de abertura (janelas) se concentram em apenas uma fachada da sala de aula, o referido percentual de abertura pode se tornar viável se as janelas forem distribuídas nas quatro fachadas da sala, o que ocuparia em torno de 34% de área de parede em cada uma das fachadas. No entanto, a solução da utilização de janelas em cada uma das quatro fachadas pode apresentar dificuldades, visto que, geralmente, as salas de aula são interligadas com outros ambientes em pelo um dos lados (fachada).

¹⁸ IEC 60268-16: *Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index* (IEC, 2011).

3.5 USO COMBINADO DE ABERTURAS E MATERIAIS ABSORVEDORES PARA OBTENÇÃO DE RESULTADOS RECOMENDÁVEIS DE PARÂMETROS ACÚSTICOS

Na seção anterior, constatou-se que o percentual de abertura de 80% em relação à área de piso da sala de aula em estudo pode constituir-se como uma estratégia para obtenção de resultados recomendáveis dos parâmetros de qualidade acústica. Entretanto, em termos construtivos, o emprego de 80% de área de abertura nem sempre pode ser exequível. Nesse sentido, na presente seção, será discutida a possibilidade de emprego simultâneo de materiais absorvedores acústicos e de aberturas (janelas) para obtenção de valores recomendáveis de parâmetros acústicos. O uso simultâneo desses dois elementos possibilita o aumento da quantidade de absorção sonora da sala e conseqüentemente, obtêm-se valores mais baixos de Tempo de Reverberação (TR).

Por meio do cálculo do coeficiente de absorção médio (Equação 16), é possível identificar os coeficientes de absorção sonora de cada superfície da sala de aula necessários para atingir resultados de coeficiente médio ponderado de absorção equivalente ao obtido na configuração com 80% de área de abertura, com o emprego de aberturas (janelas e rasgos) com 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.

A primeira situação considerou o empregado de material absorvedor sonoro somente no teto da sala de aula. Nesse caso, como os demais elementos componentes do ambiente apresentam coeficientes de absorção e áreas conhecidos, é possível, a partir da equação do coeficiente de absorção médio, isolar o valor do coeficiente de absorção a ser empregado na área do teto, que deve resultar no coeficiente de absorção sonora equivalente, obtido com a configuração de 80% de abertura em relação à área de piso. Por exemplo, ao empregar uma área de abertura de 10% em relação à área de piso, pode-se calcular o coeficiente de absorção (na frequência de 500Hz) da superfície do teto, de acordo com a seguinte expressão:

$$S_{80\%} \cdot \alpha_{abertura} = (S_{piso} \cdot \alpha_{piso}) + (S_{parede} \cdot \alpha_{parede}) + (S_{porta} \cdot \alpha_{porta}) + (S_{teto} \cdot \alpha_{teto}) + (S_{10\%} \cdot \alpha_{10\%})$$

Substituindo os coeficientes de absorção e suas respectivas áreas, têm-se:

$$38,3 \cdot 1 = (48 \cdot 0,01) + (90,68 \cdot 0,04) + (2,52 \cdot 0,14) + (48 \cdot \alpha_{teto}) + (4,8 \cdot 1)$$

Isolando o coeficiente de absorção do teto (α_{teto}) da expressão anterior, chega-se ao valor de 0,64, que corresponde ao coeficiente de absorção do material que deve revestir o teto da sala de aula em estudo.

A Tabela 12 apresenta os valores dos coeficientes de absorção do teto para o emprego simultâneo da abertura e superfícies absorvedoras sonoras a serem dispostos em toda a superfície do teto, o que corresponde a 48 m². Observa-se que com o aumento da área de abertura, menores coeficientes de absorção sonora são necessários para atingir os resultados esperados, uma vez que as aberturas são consideradas como perfeitos absorvedores acústicos, com coeficiente de absorção (α) igual a 1 (um).

Tabela 12 - Coeficientes de absorção do **teto** em função do percentual de área de abertura para atingir Tempo de Reverberação (TR) ótimo da sala em estudo

Percentual de abertura em relação à área de piso	Coeficiente de absorção (α) do teto (500Hz)
10%	0,64
15%	0,59
20%	0,55
25%	0,50
30%	0,45
35%	0,40
40%	0,35

Na segunda situação, considera-se a modificação dos materiais absorvedores em todas as superfícies de paredes da sala. O resultados dos coeficientes de absorção para uso simultâneo de aberturas e material absorvedor empregados nas paredes são apresentados na Tabela 13. Observa-se que os valores dos coeficientes de absorção demonstraram variações discretas em função dos percentuais de área de abertura. Isso ocorre porque à medida que a área de abertura é aumentada, menos área de parede ficará disponível para emprego do material absorvedor.

Tabela 13 - Coeficientes de absorção da **parede** em função do percentual de área de abertura para atingir Tempo de Reverberação (TR) ótimo da sala em estudo

Percentual de abertura em relação à área de piso	Área de parede	Coeficiente de absorção (α) da parede (500Hz)
10%	54,90 m ²	0,59
15%	52,50 m ²	0,57
20%	50,10 m ²	0,55
25%	47,70 m ²	0,53
30%	45,30 m ²	0,51
35%	42,90 m ²	0,48
40%	40,50 m ²	0,45

A modificação conjunta dos materiais componentes em toda a superfície do teto e parede da sala de aula, considerando o uso simultâneo das aberturas, determina a necessidade de menores coeficientes de absorção sonora para revestimento do teto e parede, conforme apresentado na Tabela 14, a seguir:

Tabela 14 - Coeficientes de absorção do **teto e parede** em função do percentual de área de abertura para atingir Tempo de Reverberação (TR) ótimo da sala em estudo

Percentual de abertura em relação à área de piso	Coeficiente de absorção (α) do teto e parede (500Hz)
10%	0,32
15%	0,30
20%	0,29
25%	0,27
30%	0,25
35%	0,23
40%	0,21

Vale ressaltar que o alcance de coeficientes de absorção da parede e/ou teto mais baixos à medida que a dimensão da abertura aumenta, já eram esperados, pois as aberturas, tidas como perfeitos absorvedores acústicos, contribuem para o acréscimo da quantidade de absorção sonora no ambiente.

3.6 SÍNTESE DOS RESULTADOS

O modelo de sala de aula utilizado nas simulações foi elaborado com base nas características arquitetônicas e construtivas locais mais recorrentes, além da análise estatística da amostragem de projetos arquitetônicos das edificações escolares e da rede pública de ensino de Maceió-AL, que subsidiou a identificação das dimensões mais recorrentes de salas de aula. Através do Diagrama de Bolt (1946), a dimensão do pé-direito da sala foi ajustada para que, em conjunto com as demais dimensões, largura e comprimento, a relação de proporção adequada de dimensões do ambiente fosse atendida, e assim, propiciar a distribuição modal uniforme.

O estudo das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas na qualidade acústica de salas de aula comprovou através das simulações, que o aspecto mais determinante consiste na dimensão, pois apresentou diferenças acentuadas nos resultados dos parâmetros entre os arranjos (modelos).

Em relação à influência da **dimensão** nos resultados dos parâmetros acústicos nos assentos críticos, comprovou-se que o aumento da área de abertura constitui-se como uma

estratégia para obtenção de melhores resultados dos parâmetros acústicos. Na Tabela 15, apresenta-se uma síntese dos resultados do Tempo de Reverberação (TR) (500Hz), classificação dos resultados nos assentos críticos relativos aos parâmetros: Clareza (C_{50}) (500Hz), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), indicando uma melhoria na classificação em função do aumento da área de abertura, como é possível observar nos resultados relativos à variável de dimensão das aberturas.

Especificamente, em relação ao estudo da influência da **dimensão** das aberturas, verifica-se que a cada aumento de 5% de área de abertura de janela, há uma melhoria nos valores de TR (frequência de 500Hz) em torno de 10% a 19%. Os parâmetros que sofreram maiores variações dos resultados nos assentos mais críticos em função do acréscimo em 5% de área de abertura nos arranjos foi a Clareza (C_{50}), com melhoria dos valores críticos entre 12 a 24%; seguido do Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), com variação entre 13 a 20%, enquanto o Índice de Transmissão da Fala (STI) consistiu no parâmetro de menor sensibilidade, com ganho entre 5 a 10% (Tabela 15). Observa-se que o aumento da área de abertura contribui para a maior uniformidade dos resultados dos parâmetros acústicos na sala de aula, principalmente em se tratando dos arranjos com maiores percentuais de abertura, acima de 20% de abertura.

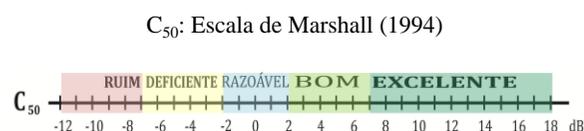
Os resultados relativos à variável **localização** das aberturas apresentaram discretas variações de valores dos parâmetros acústicos entre os arranjos. O Tempo de Reverberação (TR) obteve variação máxima entre os arranjos em torno de 2% (frequência de 500Hz). Ao comparar o arranjo de maior valor crítico com o de menor valor crítico, a variação dos valores de Clareza (C_{50}) correspondeu a cerca de 10% (frequência de 500Hz). Os valores críticos da Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons) apresentaram variação máxima de 3%, enquanto os valores críticos do Índice de Transmissão da Fala (STI) foram iguais em todos os arranjos simulados (Tabela 15). Os resultados ligeiramente mais favoráveis são encontrados nas disposições onde as aberturas se distribuem mais próximas da fonte sonora (voz do professor), o que acarreta na distribuição mais uniforme dos resultados na sala de aula.

Tabela 15 - Síntese dos resultados do Tempo de Reverberação (TR) (500Hz), classificação dos resultados nos assentos críticos relativos aos parâmetros: Clareza (C_{50}) (500Hz), Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

PARÂMETROS ACÚSTICOS	DIMENSÃO							LOCALIZAÇÃO					FORMA					
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	1 Lateral	1 Central	2 Laterais	Lateral + Central	2 Laterais + Central	Quadrada	Horizontal	Vertical	Quadrada	Horizontal	Vertical
MODELOS																		
Tempo de Reverberação (TR) (500 Hz)	2,70	2,18	1,83	1,53	1,36	1,20	1,08	2,65	2,70	2,69	2,67	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
Clareza (C_{50}) (500 Hz)	-8,49	-7,50	-6,26	-5,24	-3,97	-3,01	-2,31	-7,85	-8,49	-8,22	-8,72	-8,68	-8,37	-8,43	-8,19	-8,34	-8,36	-7,9
Índice de Transmissão da Fala (STI)	0,40	0,44	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,42	0,40
Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)	19,28	15,40	12,45	10,86	9,29	7,90	6,64	18,4	18,66	18,97	18,60	18,56	18,57	18,50	18,65	18,33	17,76	19,06

STI e %ALCons: Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011)

LEGENDA:



Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação
0.75 - 1	0 - 3%	Excelente
0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom
0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável
0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim
0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável

O estudo da **forma** das aberturas apresentou resultados com variações ainda mais discretas. Foram simulados dois conjuntos de arranjos: Grupo A e Grupo B. Em função do Grupo B possuir os arranjos com proporções entre largura e altura mais acentuadas, comparando-se com as do Grupo A, as mudanças dos valores por arranjos dos parâmetros acústicos foram discretamente mais acentuadas. O Grupo B apresentou as seguintes variações máxima de resultados: O Tempo de Reverberação (TR) variou em torno de 0,5% (frequência de 500Hz); a variação dos valores de Clareza (C_{50}) entre o arranjo de maior valor crítico e o de menor valor crítico foi de 6% (frequência de 500Hz); em relação à Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons), apresentaram variação máxima de 7%; e os valores críticos do Índice de Transmissão da Fala (STI) obtiveram variação máxima de 5% entre os arranjos simulados (Tabela 15). Os arranjos compostos de janelas verticais apresentaram valores médios sutilmente mais favoráveis.

Tendo em vista que o Tempo de Reverberação (TR) é influenciado pela quantidade de absorção presente no ambiente, pelo fato dos vãos de abertura serem contabilizados como superfícies absorvedoras sonoras (coeficiente de absorção $\alpha = 1$), os resultados obtidos indicam a relação direta entre o aumento da dimensão da abertura e a obtenção de menores valores de TR, o que pode contribuir para a inteligibilidade da fala.

Nesse sentido, realizou-se o estudo do comportamento estatístico do TR em função do percentual de área de abertura em relação à área de piso da sala de aula, com o intuito de identificar o percentual de abertura que atende aos requisitos normativos de qualidade acústica. Através da equação de ajuste, concluiu-se que 80% de abertura corresponde à configuração que atende aos valores recomendáveis dos parâmetros acústicos, comprovado por meio de nova simulação numérica, para validação do resultado.

A partir do cálculo do coeficiente médio de absorção sonora, foi possível obter através de configurações de uso combinado de aberturas (janelas) e materiais absorvedores nas superfícies internas da sala, resultados recomendáveis para qualidade acústica da sala de aula em estudo.

CONCLUSÃO

A presente dissertação avaliou a influência das variáveis de dimensão, localização e forma das aberturas na qualidade acústica de salas de aula naturalmente ventiladas com base na rede pública municipal de ensino de Maceió-AL. A simulação computacional mostrou-se como uma ferramenta adequada para obtenção dos resultados da pesquisa, visto que permitiu analisar isoladamente a influência das variáveis na qualidade acústica de salas de aula.

O modelo de sala de aula utilizado nas simulações foi elaborado a partir das dimensões (largura e comprimento) mais recorrente da rede pública municipal de ensino de Maceió-AL, de dimensões 6m (largura), 8m (comprimento), similares as de salas de aula recorrentes da rede pública de Campinas-SP, identificadas no trabalho de Amorim (2007), e de salas de aula da rede pública de ensino em Florianópolis-SC, conforme consta no trabalho de Losso (2003). Dessa forma, é possível afirmar que a recorrência das referidas dimensões de salas de aula da rede pública de ensino em outras cidades brasileiras reforçam a validade da pesquisa.

Tendo em vista que as principais atividades numa sala de aula são baseadas na comunicação verbal, com a exigência de elevados níveis de concentração, é imprescindível estabelecer condições sonoras favoráveis à palavra falada, uma vez que a qualidade acústica desses ambientes deve ser considerado na concepção projetual.

O conhecimento sobre o efeito das aberturas na qualidade acústica interna pode auxiliar o projeto arquitetônico no processo de tomada de decisões que caracteriza o trabalho do arquiteto. As aberturas são consideradas como elementos de controle ambiental das edificações, de modo que as variáveis de dimensão, localização e forma desses componentes consistem em aspectos relevantes no projeto de uma sala de aula.

Os resultados encontrados neste trabalho comprovam que as aberturas possuem potencial de melhoria dos parâmetros acústicos, indicando que a dimensão da abertura corresponde à variável de maior influência. Constatou-se assim, que as aberturas podem se constituir como componentes arquitetônicos favoráveis à qualidade acústica dos recintos, visto que o aumento da **dimensão** das aberturas implicou em melhorias expressivas dos parâmetros acústicos.

O estudo da **localização** das aberturas evidenciou que tal variável influencia de modo discreto nos resultados dos parâmetros acústicos. Entretanto, foi possível apontar que janelas

localizadas próximas à fonte sonora (voz do professor) implicam em resultados mais favoráveis dos parâmetros acústicos, contribuindo para uma distribuição mais uniforme dos valores dos parâmetros de qualidade acústica na sala de aula, embora em algumas situações tenha-se notado uma ligeira perda de qualidade nos assentos menos favoráveis. Do ponto de vista da ventilação natural e da iluminação natural, a localização das aberturas concentradas lateralmente em relação à parede da sala pode implicar em uma distribuição não uniforme da corrente de ar e da iluminação no interior do ambiente.

O estudo do efeito da variável **forma** das aberturas constatou variações sutis nos resultados dos parâmetros acústicos, de maneira que tal variável representa menor influência nos resultados, comparando-se com às demais variáveis consideradas no presente trabalho. Observou-se que os arranjos compostos de janelas verticais proporcionam uma distribuição mais uniforme dos valores dos parâmetros acústicos, ou seja, melhores valores médios na sala de aula. No entanto, os arranjos com janelas horizontais apresentaram configurações com melhores resultados nos assentos mais críticos, menos favoráveis. Além disso, as janelas horizontais podem favorecer uma distribuição mais uniforme dos níveis de iluminação natural na sala de aula. Vale lembrar que em se tratando de aberturas de entrada de ar com forma horizontal, estas apresentam maior rendimento médio para todos os ângulos de incidência do vento¹⁹.

A variável localização e forma das aberturas induziram a discretas mudanças nos resultados dos parâmetros acústicos da sala de aula, portanto, no processo de tomada de decisões no projeto arquitetônico, tais variáveis podem ser priorizadas em relação aos aspectos do conforto térmico e lumínico.

No tocante à influência dos materiais no comportamento sonoro do ambiente, vale frisar que nas salas de aula da rede pública municipal de ensino de Maceió, observa-se o emprego de materiais rígidos, de baixa absorção sonora, como por exemplo, revestimento cerâmico em grande parte das paredes, piso em concreto polido e forro de PVC, além de mobiliário, elementos estes que não favorecem a qualidade acústica. O emprego dos materiais de baixa absorção contribuiu para a obtenção de elevados valores do Tempo de Reverberação (TR) na maioria dos modelos simulados, que excederam às recomendações presentes nas normas técnicas.

¹⁹ Sobin (1981 *apud* Bittencourt e Cândido, 2008).

Através do estudo estatístico apresentado no corrente trabalho, verificou-se que é possível estimar configurações de áreas de abertura que atendam aos valores dos parâmetros acústicos recomendáveis, considerando somente a influência da dimensão da abertura no Tempo de Reverberação (TR). A possibilidade do emprego de material absorvedor sonoro nas superfícies da sala em conjunto com as aberturas (janelas e rasgos), pode resultar em soluções de tratamento para alcance de resultados recomendáveis de qualidade acústica para salas de aula.

O aumento da **dimensão** das aberturas também favorece a ventilação natural no interior da sala de aula, o que pode contribuir para obtenção do conforto térmico por meio de alternativas passivas de projeto de acordo com os conceitos de arquitetura bioclimática. Além de promover o aumento da corrente de ar interna, as aberturas contribuem para captação da iluminação natural. Nesse contexto, as aberturas, tidas como componentes de controle ambiental, quando bem planejadas, podem contribuir para o projeto de edificações escolares mais sustentáveis, ambientalmente adequadas e confortáveis.

É necessário fazer a ressalva de que as edificações escolares que requerem o uso da ventilação natural devem ser associadas ao planejamento da localização no contexto urbano, a fim de evitar níveis de ruído acima dos toleráveis. Além da preocupação com o entorno, o zoneamento das escolas pode favorecer maior proteção dos ambientes de salas de aula em relação às fontes sonoras externas.

Limitações da pesquisa

A equação ajustada que correlaciona o Tempo de Reverberação (TR) em função do percentual de área de abertura em relação ao piso, aplica-se especificamente ao modelo de sala de aula empregado nas simulações. Entretanto, a metodologia em questão possui potencial para aplicabilidade em outros trabalhos, desde que os parâmetros sejam ajustados de acordo com os resultados numéricos das configurações estudadas.

Sugestões de trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem ser realizados com temática semelhante, porém com abrangências diferenciadas. No tocante ao estudo da tendência do comportamento estatístico do Tempo de Reverberação (TR) em função do percentual de abertura, podem ser realizados trabalhos que considerem outras dimensões e formas de ambientes.

Indica-se a realização de pesquisas que tratem da influência da tipologia das janelas, a exemplo da pivotante, basculante, de correr, no campo sonoro da sala, e assim, a interferência na qualidade acústica interna de salas de aula. Além disso, sugere-se o estudo da influência de dispositivos de proteção solar, como *brises*, suas diferentes configurações e tipos na qualidade acústica interna de salas de aula. Os resultados podem ser correlacionados com as pesquisas existentes na área do desempenho térmico e lumínico.

É necessário também a investigação sobre o zoneamento das escolas e soluções que possam contribuir para a concepção de projetos onde as salas de aula sejam menos expostas ao ruídos externos.

Estudos que envolvam avaliações integradas, que correlacionem aspectos diversos de conforto ambiental, podem contribuir para uma compreensão sob uma visão global do projeto arquitetônico, que leva em consideração cada um dos seus componentes, tanto pela sua função específica, quanto pela função que exerce no conjunto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220** – Desempenho térmico de edificações (partes 1, 2 e 3). Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. **NBR 10151** – Avaliação de ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

_____. **NBR 10152** – Níveis de Ruído para Conforto Acústico. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

_____. **NBR 12179** – Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

_____. **NBR 15575** – Edifícios Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ACOUSTIC DESIGN AHNERT; AFMG TECHNOLOGIES GMBH. **Ease 4.3 - User's Guide & Tutorial**. Disponível em: < http://www.afmg-support.eu/AFMGDownloads/Downloads.aspx?SWP=EASE&FILE=EASE_4.3_Tutorial_English.pdf> Acesso em 3jun. 2013-a.

ACOUSTIC DESIGN AHNERT; AFMG TECHNOLOGIES GMBH. **Ease 4.3**. 2013-b.

AMORIM, A. E. B. **Formas geométricas e qualidade acústica de salas de aula**: estudo de caso em Campinas-SP. Dissertação (Mestrado). Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2007.

ANSI - AMERICAN NATIONAL STANDARD. **ANSI S12.60**: Acoustical Performance Criteria, Design Requirements, and Guidelines for Schools. Accredited Standards Committee S12, Noise. Standards Secretariat Acoustical Society of America, Melville, NY: American National Standards Institute, Inc, 2002, 50p.

ARAÚJO, B. C. D. de. **Proposta de elemento vazado acústico**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

BALLOU, G. M. **Handbook for sound engineers**. 2. ed. EUA: SAMS, 1991. 221p.

BARRON, M. **Auditorium acoustics and architectural design**. 2. ed. New York: Spon Press, 2010. 466p.

BISTAFA, S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 368p.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Introdução à Ventilação Natural**. 3ª Edição. Maceió: EDUFAL, 2008. 173p.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. **Ventilação natural em Edificações**. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA, 2010. 98p.

BOLT, R. H. Note on the normal frequency statistics in rectangular rooms. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**, v. 18, p. 130-133, 1946.

BONELLO, O. J. A New Criterion for the Distribution of Normal Room Modes, **JAES**, v. 29, n. 12, pp. 597–606, 1981.

BRADLEY, J. S. Optimising Sound Quality for Classrooms. In: Encontro da SOBRAC, II Simpósio Brasileiro de Metrologia em Acústica e Vibrações – SIBRAMA, 20., 2002, Rio de Janeiro. **Anais...**

BRADLEY, J. S. Review of objective room acoustics measures and future needs. **Applied Acoustics**, v.72, p.713-720, 2011.

BRADLEY, J. S. Speech Intelligibility studies in classrooms. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**, v. 80, n.3, p. 846-854, 1986.

BRADLEY, J. S.; REICH, R.; NORCROSS, S. On the combined effects of signal-to-noise ratio and room acoustics on speech intelligibility. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**, v.106, n.4, p.1820-1828, 1999.

BRÜEL & KJAER. **Application Note: measuring speech intelligibility using DIRAC-Type 7841**. In: CATÁLOGO TÉCNICO, Brüel & Kjaer Instruments, Chigago, Illinois, USA, 2005. Disponível em:< <http://www.bksv.com/doc/bo0506.pdf>> Acesso em: 10 Jun. 2013.

BRÜEL & KJAER. **Architectural acoustics**. 2ed. USA: Brüel &Kjaer, 1978. 170p.

CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica**. Brasília: Thesaurus, 2006.

CAVANAUGH, W. J. e WILKES, J. A. **Architectural Acoustics: Principles and Practices**, 1a. edição. Nova York: John Wiley & Sons Inc., 1999. 304p.

CHRISTENSEN, C. L. **Odeon Room Acoustics Program**, Version 10, User Manual. The Department of Acoustic Technology, Technical University of Denmark, 2009.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos – conforto ambiental**. Rio de Janeiro: Revan, 2003. 287p.

COSTA, A. M. V. da. **Adequação de edificações escolares ao contexto climático de Maceió-AL, com vistas à otimização de seu desempenho térmico**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação Dinâmicas do Espaço Habitado – DEHA. Universidade Federal de Alagoas – UFAL. Maceió, 2012.

DE GIULI, V.; DA POS, O.; DE CARLI, M. Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. **Building and Environment**. v. 56, p. 335-345, 2012.

DIAS, A. **Avaliação das Condições de Conforto Térmico e Acústico de Salas de Aula em Escola de Tempo Integral - Estudo de Caso da Escola Padre Josimo em Palmas (TO)**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília (Minter UnB/UFT). Brasília, 2009.

-
- EGAN, M. David. **Architectural Acoustics**. New York: McGraw-Hill, 1988. 411p.
- EVEREST, F.A. **Master handbook of acoustics**. 4.ed. Melville, New York, USA: McGraw-Hill: 2001. 616p.
- EYRING, C. F. Reverberation time in “dead” rooms. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v.1, p.217-241, 1930.
- FARINA, A. RAMSETE-A new Pyramid Tracer for medium and large scale acoustic problems. **Proceedings of Euro-Noise**, France, 1995.
- FIELD, C. D.; DIGERNESS, J. Acoustical design for naturally ventilated building. In: ACOUSTICS'08, Paris, France. **Anais...**Paris, France, 2008. 1CD-ROM.
- GERGES, S. N. Y. **Ruído: fundamentos e controle**. 2.ed. Florianópolis: NR Editora, UFSC, 2000. 696p.
- HARRIS, C. M. **Handbook of acoustical measurements and noise control**. 3. ed. Acoustical Society of America, 1998.
- HODGSON, M.; NOSAL, E. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. **Journal of Acoustic Society of America-JASA**. v. 111, n. 2, p. 931-939, 2002.
- HOUTGAST, T.; STEENEKEN, H. J. M.; PLOMP, R. Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function. I. General Room Acoustics. **Acustica**, v. 46, p. 60-72, 1980.
- HYAMS, D. **CurveExpert Basic Version 1.4**. 2009.
- IEC - INTERNACIONAL ELETROTECHINICAL COMMISSION. **IEC 60268-16: Sound system equipment – Part 16: Objective Rating of Speech Intelligibility by Speech Transmission Index**, 2011.
- INEP - Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. **DataEscolaBrasil**. Disponível em: <http://www.dataescolabrasil.inep.gov.br/dataEscolaBrasil/> . Acesso em 1maio 2014.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3382: Acoustics - Measurements of the Reverberation Time of Rooms with Reference to Other Acoustical Parameters**. Geneva, Switzerland. 2ed. 1997. 21p.
- KARABIBER, K.; VALLET, M. Classroom acoustics policies- an overview. In: EURONOISE CONGRESS, 2003, Naples, Italy. **Proceedings....** Naples, Italy, 2003.
- KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011. 270p.
- KRUZINS, E., FRICKE, F. The Prediction of Sound Fields in Non-diffuse Spaces by a ‘Random Walk’ Approach. **Journal of Sound and Vibration**. v. 81, n.4, p.549-564, 1982.

KUTTRUFF, H. **Room Acoustics**. 2.ed. London, UK: Applied Science Publishers LTD.,1979. 300p.

LMS INTERNATIONAL. **Raynoise**, Rev 3.0, User's Manual. Bélgica, 1998.

LOSSO, M. A. F. **Qualidade acústica de edificações escolares em Santa Catarina: avaliação e elaboração de diretrizes para projeto e implantação**. 149p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

MARSHALL, L. G. An acoustics measurement program for evaluating auditoriums based on the early/late sound energy ratio. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 96, p.2251-2261, 1994.

MARSHALL, L. G. Speech intelligibility prediction from calculated C_{50} values. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 98, p.2845-2847, 1995.

MARTELLOTTA, F. On the sound absorption by openings in rooms (L). **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 132, n.5, p. 2951–2954, 2012.

MEC - MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CULTURA. **Espaços educativos – ensino fundamental: subsídios para elaboração de projetos e adequação de edificações escolares**. Cadernos técnicos, n. 4, v.2. Brasília: FUNDESCOLA, 2002.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural acoustics: principles and design**. Columbus: Prentice Hall, 1999. 446p.

MILLINGTON, J. G. A modified formula for reverberation. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 4, n.1, p. 69-82, 1932.

NOGUEIRA, F. F. **Análise Paramétrica do Campo Acústico de Escritórios Panorâmicos**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

OITICICA, M. L. G. da R. **Desempenho acústico de diferentes tipologias de peitoris ventilados**. Tese (Doutorado). Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2010.

OITICICA, M. L. G. da R.; ALVINO, I. L.. **Diagnóstico das condições de ruído de fundo das Instituições de Ensino Público de 1º Grau da Cidade de Maceió**. Maceió, 2005. Relatório Final (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC). Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas.

OITICICA, M. L. G. da R.; DUARTE, I. L.; SILVA, L. B. da. Análise da inteligibilidade da fala de uma sala de aula em situações diversas de climatização dentro do contexto acústico. In: **Anais do ENCAC-COTEDI**, 2003, Curitiba.

OITICICA, M. L. G. da R.; MORAIS, M. S. da S. **A ventilação natural e a dicotomia térmica e acústica das escolas da Rede Pública de Ensino de 1º Grau da cidade de Maceió-AL**. Maceió, 2012. Relatório Final (Programa Institucional de Bolsas de Iniciação

Científica – PIBIC CNPq/UFAL/FAPEAL). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas.

PEUTZ, V.M.A. Articulation loss of consonants as a criterion for speech transmission in a room. **Journal Audio Engineering Society**. v. 19, p. 915-919, 1971.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MACEIÓ, **Lei Municipal Nº 5.593**, de 08 de Fevereiro de 2007. Institui o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió. Disponível em: <http://www.maceio.al.gov.br>. Acesso em: 19 set. 2013.

SABINE, W. C. **Collected Papers on Acoustics**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1922.

SANTOS, R. de L. S. dos. **Análise da Influência de Parâmetros Acústicos na Inteligibilidade da Fala**: Um Estudo em Salas de Escolas Municipais de João Pessoa. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2012.

SAUTER, A.; SOROKA, W. W. Sound transmission through rectangular slots of finite depth between reverberant rooms. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 47, n.1, p.5–11, 1970.

SCHNEIDER, M. Do school facilities affect academic outcomes? **National Clearinghouse for Educational Facilities**. Washington, USA, 2002. 24p. Disponível em: <<http://www.ncef.org/pubs/outcomes.pdf>>. Acesso em: 5 jun. 2013.

SCHRÖEDER, M. R.; KUTRUFF, H. On frequency response curves in room. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**, v. 34, n.1 p. 76-80, 1962.

SEEP, B.; HULCE, E.; LINN, M.; WHO, P.A. **Classroom Acoustics I: a resource for creating learning environment with desired listening conditions**. Technical Committee on Architectural Acoustics of the Acoustical Society of America- ASA, Melville, NY, USA, 2000, 28p.

SETTE, W. J. A new reverberation time formula. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 4, p.193-210, 1933.

SGARD, F; H. NELISSE, H.; ATALLA, N. On the modeling of the diffuse field sound transmission loss of finite thickness apertures. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 12, n.1, p.302–313, 2007.

SILVA, J. T. da. **Estudo comparativo do desempenho acústico, térmico e energético das envoltórias de escolas públicas em Maceió-AL**. 2011. Trabalho Final de Graduação. (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Alagoas.

THIELE, F. W. Richtungsverteilung und zeitfolge der schallrückwürfe in räumen. **Acustica**, v. 3, p. 291-301, 1953.

TISSEYRE, A.; MOULINIER, A.; ROURD, Y. Intelligibility in various rooms: comparing its assessment by (RA)STI measurement with a direct measurement. **Applied Acoustics**. v. 3, n. 1-3, p. 179-191, 1998.

TORO, M. G. U. **Avaliação Acústica de Salas de Aula em Escolas Públicas na cidade de Belém-PA**. 174p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. Belém, 2005.

TROMPETTE, N.; BARBRY, J. L.; SGARD, F.; NELISSE, H. Sound transmission loss of rectangular and slit-shaped apertures: Experimental results and correlation with a modal model. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 125, n.1, p. 31-41, 2009.

U.S. ACCESS BOARD. **Listening for Learning 1: The Importance of Good Classroom Acoustics**. FEDERAL AGENCY COMMITTED TO ACCESSIBLE DESIGN. Washington, 2003-a.

U.S. ACCESS BOARD. **Listening for Learning 2: Will Our New Classrooms Meet the Standard?** FEDERAL AGENCY COMMITTED TO ACCESSIBLE DESIGN. Washington, 2003-b.

VALLE, S. do. **Manual prático de acústica**. 3 ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2009. 355p.

WACKERNAGEL, M.; ONISTO, L.; LINARES, A.C.; FALFAN, I.S.L. GARCIA, J.M., GUERRERO, A.I.S. and GUERRERO, M.G.S., **National Natural Capital Accounting with the Ecological Footprint Concept, Ecological Economics**, v. 29, p.375-390, 1999.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Résumé D'orientation Des Directives De I'oms Relatives Au Bruit Dans I'environnement** [documentos on line] 2003. Disponível em <http://www.collectif124.be/.../directives_OMS_sur_le_bruit_dans_l_environnement.pdf>. Acesso em: 4 Abril2013.

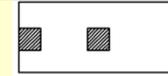
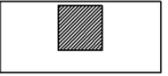
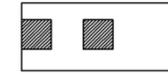
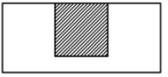
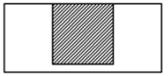
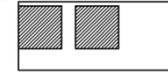
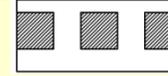
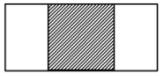
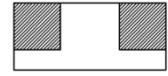
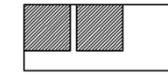
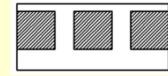
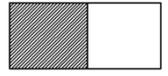
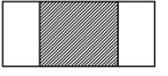
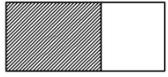
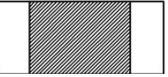
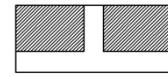
WILSON, G. P.; SOROKA, W. W. Approximation to the diffraction of sound by a circular aperture in a rigid wall of finite thickness. **Journal of the Acoustical Society of America-JASA**. v. 37, n.2, 1965, p.287-297.

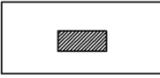
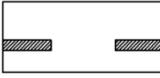
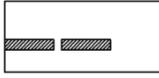
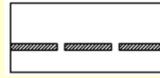
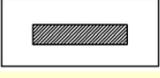
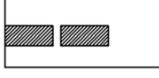
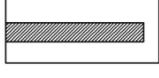
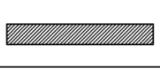
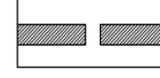
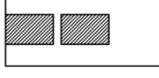
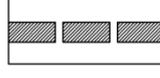
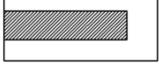
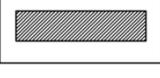
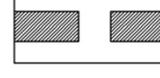
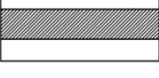
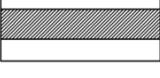
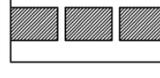
ZANNIN, P.H.T.; LORO, C. P. Acoustical quality of educational buildings- the acoustic of modular classrooms. In: INTERNATIONAL CONGRESS AND EXPOSITION ON NOISE CONTROL ENGINEERING. Environmental Noise Control- INTERNOISE, 34.th, Aug. 2005, Rio de Janeiro, Brazil. **Proceedings...** Rio de Janeiro, Brazil, 2005, 10p. 1CD-ROM.

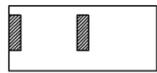
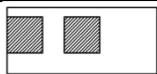
ZWIRTES, D. P. Z. **Avaliação do desempenho acústico de salas de aula: estudo de caso nas escolas estaduais do Paraná**. 148p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. Universidade Federal do Paraná. Paraná, 2006.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Matriz de arranjos das aberturas

FORMA: Quadrada					
LOCALIZAÇÃO DIMENSÃO	1 Lateral	1 Central	2 Laterais	Lateral + Central	2 Laterais + Central
10%	 A10-1L-Q	 A10-1C-Q	 A10-2L-Q	 A10-1L1C-Q	 A10-2L1C-Q
15%	 A15-1L-Q	 A15-1C-Q	 A15-2L-Q	 A15-1L1C-Q	 A15-2L1C-Q
20%	 A20-1L-Q	 A20-1C-Q	 A20-2L-Q	 A20-1L1C-Q	 A20-2L1C-Q
25%	 A25-1L-Q	 A25-1C-Q	 A25-2L-Q	 A25-1L1C-Q	 A25-2L1C-Q
30%	 A30-1L-Q	 A30-1C-Q	 A30-2L-Q	 A30-1L1C-Q	 A30-2L1C-Q
35%	 A35-1L-Q	 A35-1C-Q	 A35-2L-Q	-----	 A35-2L1C-Q
40%	 A40-1L-Q	 A40-1C-Q	 A40-2L-Q	-----	 A40-2L1C-Q
LEGENDA:	 Arranjos seleccionados para a simulação acústica				

FORMA: Horizontal					
LOCALIZAÇÃO DIMENSÃO	1 Lateral	1 Central	2 Laterais	Lateral + Central	2 Laterais + Central
10%	 A10-1L- H	 A10-2C- H	 A10-2L- H	 A10-1L1C- H	 A10-2L1C- H
15%	 A15-1L- H	 A15-1C- H	 A15-2L- H	 A15-1L1C- H	 A15-2L1C- H
20%	 A20-1L- H	 A20-1C- H	 A20-2L- H	 A20-1L1C- H	 A20-2L1C- H
25%	 A25-1L- H	 A25-1C- H	 A25-2L- H	-----	 A25-2L1C- H
30%	 A30-1L- H	 A30-1C- H	-----	-----	 A30-2L1C- H
35%	-----	-----	-----	-----	-----
40%	-----	-----	-----	-----	-----
LEGENDA:	 Arranjos selecionados para a simulação acústica				

FORMA: Vertical					
LOCALIZAÇÃO DIMENSÃO	1 Lateral	1 Central	2 Laterais	Lateral + Central	2 Laterais + Central
10%	 A10-1L-V	 A10-1C- V	 A10-2L- V	 A10-1L1C- V	 A10-2L1C- V
15%	 A15-1L- V	 A15-1C- V	 A15-2L- V	 A15-1L1C- V	 A15-2L1C- V
20%	-----	-----	 A20-2L- V	 A20-1L1C- V	 A20-2L1C- V
25%	-----	-----	-----	-----	 A25-2L1C- V
30%	-----	-----	-----	-----	-----
35%	-----	-----	-----	-----	-----
40%	-----	-----	-----	-----	-----
LEGENDA:	 Arranjos selecionados para a simulação acústica				

APÊNDICE B - Resultados do Tempo de Reverberação (TR) e valores críticos dos demais parâmetros acústicos: variável dimensão

VARIÁVEL DIMENSÃO																	
DIMENSÃO	MODELO	Tempo de Reverberação (TR)							Clareza (C_{50})							Índice de Transmissão da Fala (STI)	Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)
		Frequências (Hz)							Frequências (Hz)								
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
10%	A10-2L1C-Q	3,21	3,02	2,70	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,57	-8,96	-8,49	-8,02	-6,19	-5,85	-1,29	0,40 (ruim)	19,28 (ruim)
15%	A15-2L1C-Q	2,49	2,38	2,18	1,93	1,88	1,75	1,10	-8,40	-7,86	-7,50	-7,10	-5,38	-5,15	-0,94	0,44 (ruim)	15,40 (ruim)
20%	A20-2L1C-Q	2,04	1,96	1,83	1,65	1,61	1,51	1,01	-7,06	-6,62	-6,26	-5,95	-4,13	-4,00	-0,03	0,48 (razoável)	12,45 (razoável)
25%	A25-2L1C-Q	1,71	1,66	1,53	1,43	1,4	1,33	0,92	-5,97	-5,47	-5,24	-4,98	-3,21	-3,04	0,75	0,51 (razoável)	10,86 (razoável)
30%	A30-2L1C-Q	1,47	1,43	1,36	1,26	1,23	1,18	0,84	-4,68	-4,23	-3,97	-3,79	-1,96	-1,87	1,76	0,54 (razoável)	9,29 (razoável)
35%	A35-2L1C-Q	1,25	1,26	1,20	1,15	1,10	1,03	0,77	-3,46	-3,24	-3,01	-3,06	-1,03	-0,77	2,77	0,57 (razoável)	7,90 (razoável)
40%	A40-2L1C-Q	1,12	1,13	1,08	1,04	1,00	0,94	0,72	-2,61	-2,42	-2,31	-2,34	-0,41	-0,15	3,28	0,60 (bom)	6,64 (bom)

LEGENDA:	STI e %ALCons: Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011)																			
	<p>C_{50}: Escala de Marshall (1994)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo de valores de STI</th> <th>Intervalo de valores de %ALcons</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,75 - 1</td> <td>0 - 3%</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>0,6 - 0,75</td> <td>3% - 7%</td> <td>Bom</td> </tr> <tr> <td>0,45 - 0,6</td> <td>7% - 15%</td> <td>Razoável</td> </tr> <tr> <td>0,3 - 0,45</td> <td>15% - 33%</td> <td>Ruim</td> </tr> <tr> <td>0 - 0,3</td> <td>33% - 100%</td> <td>Inaceitável</td> </tr> </tbody> </table>	Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação	0,75 - 1	0 - 3%	Excelente	0,6 - 0,75	3% - 7%	Bom	0,45 - 0,6	7% - 15%	Razoável	0,3 - 0,45	15% - 33%	Ruim	0 - 0,3	33% - 100%	Inaceitável
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação																		
0,75 - 1	0 - 3%	Excelente																		
0,6 - 0,75	3% - 7%	Bom																		
0,45 - 0,6	7% - 15%	Razoável																		
0,3 - 0,45	15% - 33%	Ruim																		
0 - 0,3	33% - 100%	Inaceitável																		

APÊNDICE C - Resultados do Tempo de Reverberação (TR) e valores críticos dos demais parâmetros acústicos: variável localização

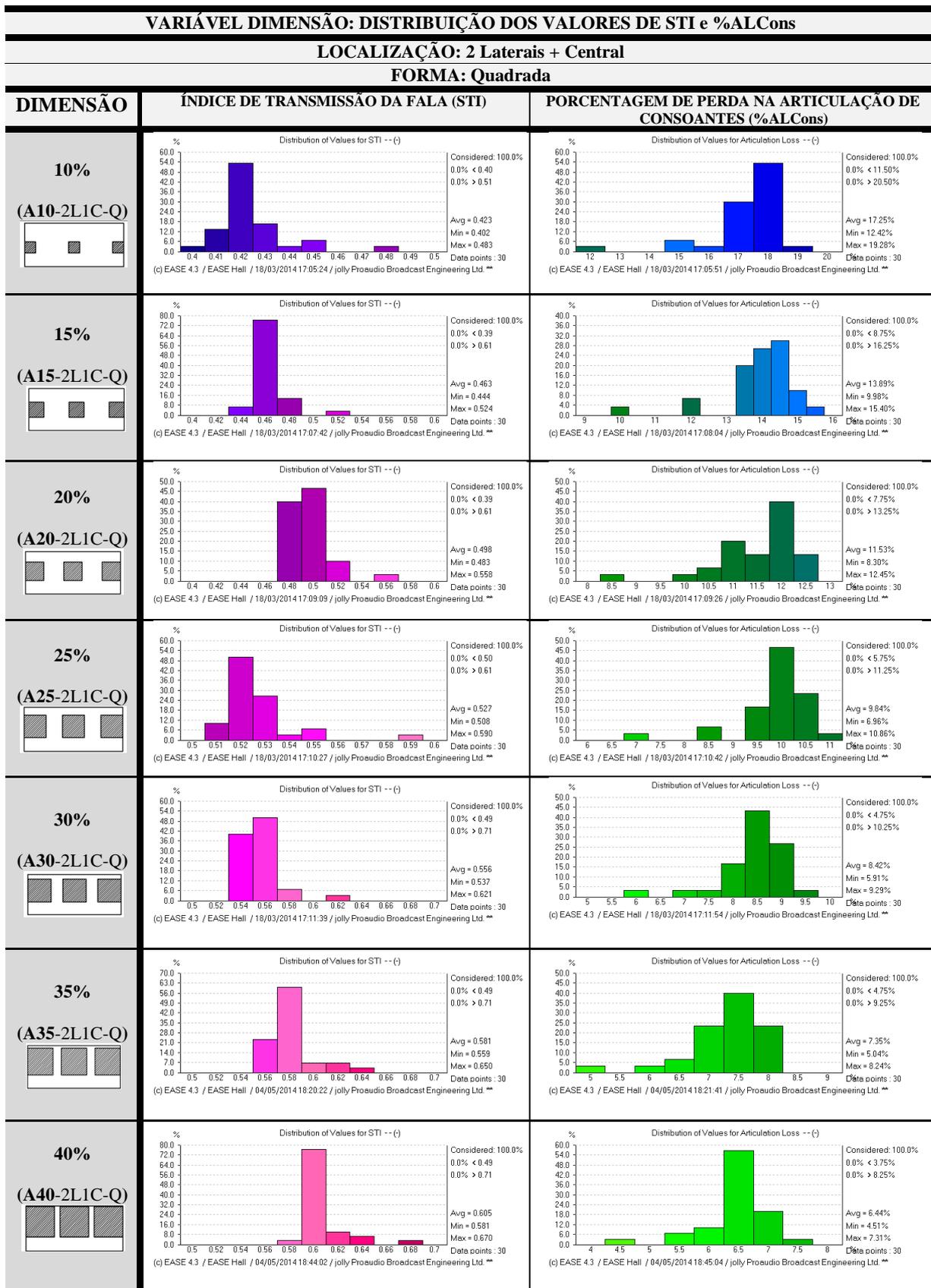
VARIÁVEL LOCALIZAÇÃO																	
LOCALIZAÇÃO	MODELO	Tempo de Reverberação (TR)							Clareza (C ₅₀)							Índice de Transmissão da Fala (STI)	Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)
		Frequências (Hz)							Frequências (Hz)								
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	125	250	500	1000	2000	4000	8000		
1 Lateral	A10-1L-Q	3,17	2,97	2,65	2,28	2,22	2,08	1,22	-9,10	-8,49	-7,85	-7,41	-5,52	-5,34	-0,84	0,41 (ruim)	18,40 (ruim)
1 Central	A10-1C-Q	3,21	3,02	2,7	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,51	-8,98	-8,49	-8,04	-6,21	-5,89	-1,32	0,41 (ruim)	18,66 (ruim)
2 Laterais	A10-2L-Q	3,19	3,00	2,69	2,31	2,25	2,07	1,22	-9,33	-8,73	-8,22	-7,72	-5,82	-5,65	-1,08	0,41 (ruim)	18,97 (ruim)
Lateral + Central	A10-1L1C-Q	3,18	2,99	2,67	2,3	2,32	2,06	1,22	-9,78	-9,17	-8,72	-8,15	-6,35	-6,12	-1,64	0,41 (ruim)	18,60 (ruim)
2 Laterais + Central	A10-2L1C-Q	3,21	3,02	2,7	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,75	-9,1	-8,68	-8,09	-6,35	-6,11	-1,61	0,41 (ruim)	18,56 (ruim)

LEGENDA:	C ₅₀ : Escala de Marshall (1994)	
STI e %ALCons: Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011)		
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALcons	Classificação
0.75 - 1	0 - 3%	Excelente
0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom
0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável
0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim
0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável

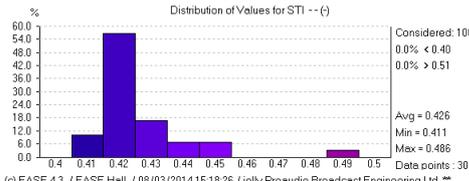
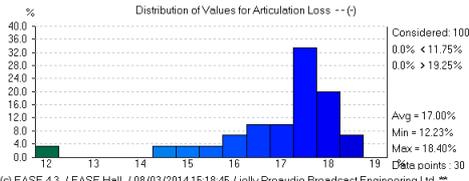
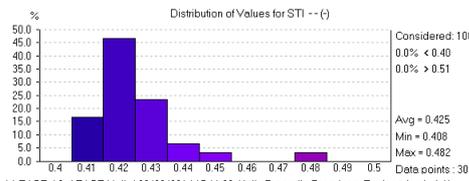
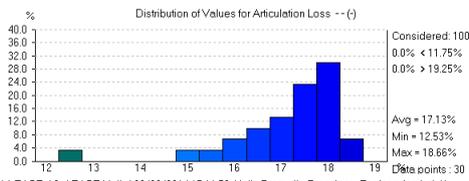
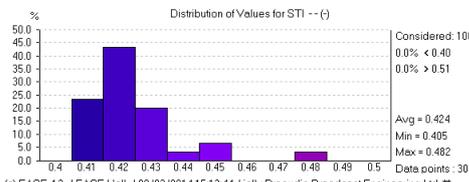
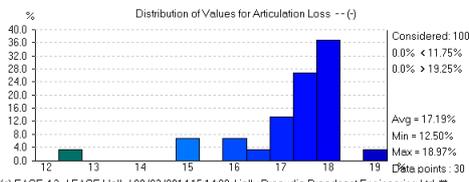
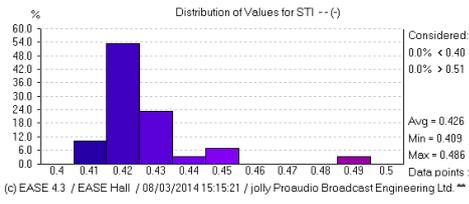
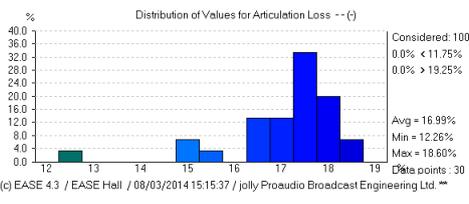
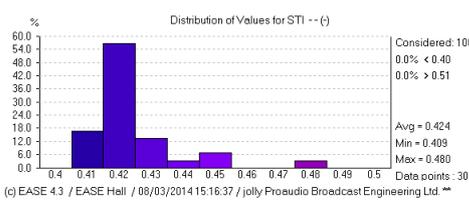
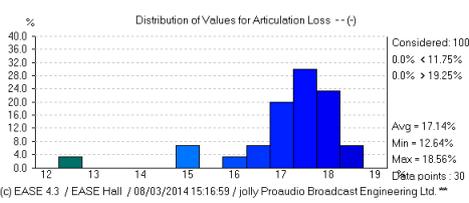
APÊNDICE D - Resultados do Tempo de Reverberação (TR) e valores críticos dos demais parâmetros acústicos: variável forma

[GRUPO A]		VARIÁVEL FORMA																															
FORMA	MODELO	Tempo de Reverberação (TR)							Clareza (C ₅₀)							Índice de Transmissão da Fala (STI)	Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)																
		Frequências (Hz)							Frequências (Hz)																								
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	125	250	500	1000	2000	4000	8000																		
Quadrada	A10-1C-Q	3,21	3,02	2,70	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,49	-8,86	-8,37	-7,89	-6,06	-5,76	-1,23	0,41 (ruim)	18,57 (ruim)																
Horizontal	A10-1C-H	3,21	3,02	2,70	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,6	-8,98	-8,43	-8,04	-6,12	-5,08	-1,41	0,41 (ruim)	18,5 (ruim)																
Vertical	A10-1C-V	3,2	3,01	2,70	2,32	2,25	2,08	1,23	-9,25	-8,63	-8,19	-7,63	-5,81	-5,57	-1,16	0,41 (ruim)	18,65 (ruim)																
[GRUPO B]		VARIÁVEL FORMA																															
FORMA	MODELO	Tempo de Reverberação (TR)							Clareza (C ₅₀)							Índice de Transmissão da Fala (STI)	Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)																
		Frequências (Hz)							Frequências (Hz)																								
		125	250	500	1000	2000	4000	8000	125	250	500	1000	2000	4000	8000																		
Quadrada	A10-2L1C-Q	3,21	3,02	2,70	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,46	-8,82	-8,34	-7,84	-6,02	-5,73	-1,22	0,41 (ruim)	18,33 (ruim)																
Horizontal	A10-2L1C-H	3,21	3,02	2,70	2,32	2,26	2,08	1,23	-9,46	-8,85	-8,36	-7,78	-6,69	-5,79	-1,47	0,42 (ruim)	17,76 (ruim)																
Vertical	A10-2L1C-V	3,2	3,01	2,70	2,32	2,25	2,08	1,23	-9,11	-8,5	-7,9	-7,47	-5,51	-5,31	-0,88	0,40 (ruim)	19,06 (ruim)																
LEGENDA:		<p>STI e %ALCons: Escala de classificação de acordo com a norma IEC 60268-16 (2011)</p> <p>C₅₀: Escala de Marshall (1994)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Intervalo de valores de STI</th> <th>Intervalo de valores de %ALCons</th> <th>Classificação</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.75 - 1</td> <td>0 - 3%</td> <td>Excelente</td> </tr> <tr> <td>0.6 - 0.75</td> <td>3% - 7%</td> <td>Bom</td> </tr> <tr> <td>0.45 - 0.6</td> <td>7% - 15%</td> <td>Razoável</td> </tr> <tr> <td>0.3 - 0.45</td> <td>15% - 33%</td> <td>Ruim</td> </tr> <tr> <td>0 - 0.3</td> <td>33% - 100%</td> <td>Inaceitável</td> </tr> </tbody> </table>														Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALCons	Classificação	0.75 - 1	0 - 3%	Excelente	0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom	0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável	0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim	0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável
Intervalo de valores de STI	Intervalo de valores de %ALCons	Classificação																															
0.75 - 1	0 - 3%	Excelente																															
0.6 - 0.75	3% - 7%	Bom																															
0.45 - 0.6	7% - 15%	Razoável																															
0.3 - 0.45	15% - 33%	Ruim																															
0 - 0.3	33% - 100%	Inaceitável																															

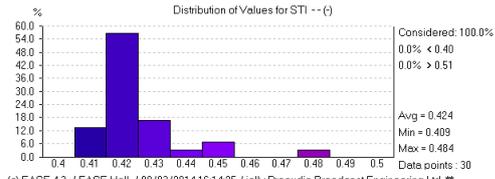
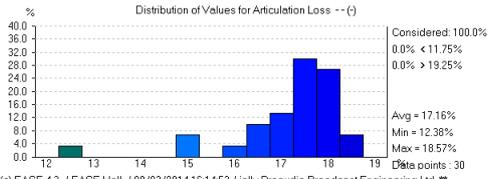
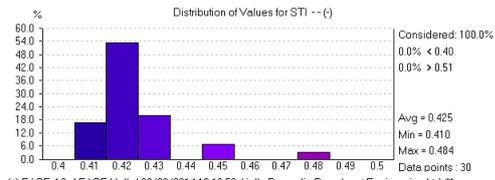
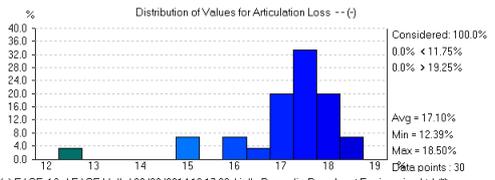
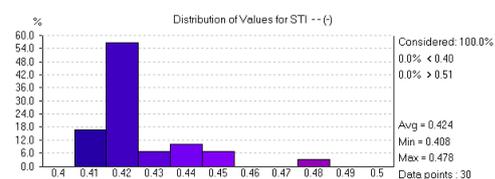
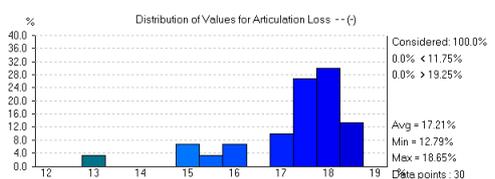
APÊNDICE E - Variável dimensão: distribuição dos valores do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)



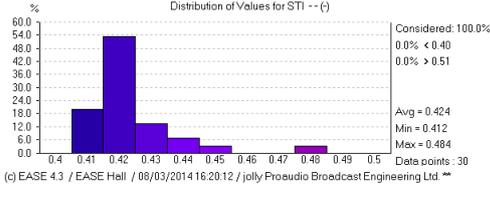
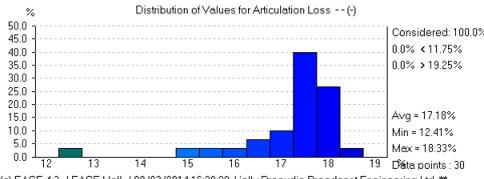
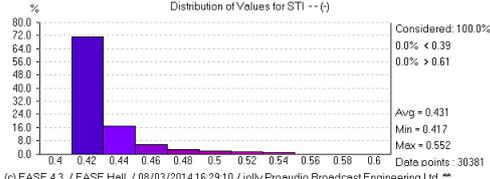
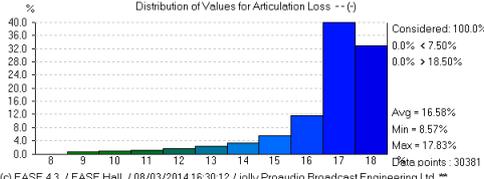
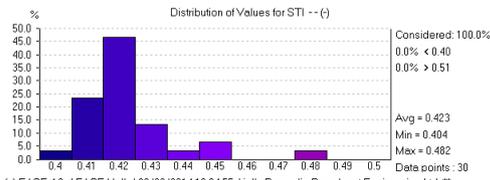
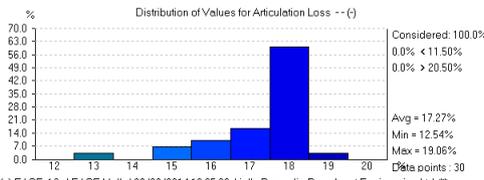
APÊNDICE F - Variável localização: distribuição dos valores do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

VARIÁVEL LOCALIZAÇÃO: DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE STI e %ALCons		
DIMENSÃO: 10%		
FORMA: Quadrada		
LOCALIZAÇÃO	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)	PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)
1 Lateral (A10-1L-Q) 	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:18:26 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:18:45 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>
1 Central (A10-1C-Q) 	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:11:36 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:11:58 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>
2 Laterais (A10-2L-Q) 	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:13:44 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:14:22 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>
Lateral + Central (A10-1L1C-Q) 	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:15:21 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:15:37 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>
2 Laterais+ Central (A10-2L1C-Q) 	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:16:37 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>	 <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 15:16:59 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. [™]</p>

APÊNDICE G - [Grupo A] Variável forma: distribuição dos valores do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

[GRUPO A] VARIÁVEL FORMA: DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE STI e %ALCons		
DIMENSÃO: 10%		
LOCALIZAÇÃO: Central		
FORMA	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)	PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)
Quadrada (A10-1C-Q) 	 <p>Distribution of Values for STI -- (-)</p> <p>Considered: 100.0%</p> <p>0.0% < 0.40</p> <p>0.0% > 0.51</p> <p>Avg = 0.424</p> <p>Min = 0.409</p> <p>Max = 0.484</p> <p>Date points : 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:14:25 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. **</p>	 <p>Distribution of Values for Articulation Loss -- (-)</p> <p>Considered: 100.0%</p> <p>0.0% < 11.75%</p> <p>0.0% > 19.25%</p> <p>Avg = 17.16%</p> <p>Min = 12.38%</p> <p>Max = 18.57%</p> <p>Date points : 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:14:53 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. **</p>
Horizontal (A10-1C-H) 	 <p>Distribution of Values for STI -- (-)</p> <p>Considered: 100.0%</p> <p>0.0% < 0.40</p> <p>0.0% > 0.51</p> <p>Avg = 0.425</p> <p>Min = 0.410</p> <p>Max = 0.484</p> <p>Date points : 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:16:50 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. **</p>	 <p>Distribution of Values for Articulation Loss -- (-)</p> <p>Considered: 100.0%</p> <p>0.0% < 11.75%</p> <p>0.0% > 19.25%</p> <p>Avg = 17.10%</p> <p>Min = 12.39%</p> <p>Max = 18.50%</p> <p>Date points : 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:17:08 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. **</p>
Vertical (A10-1C-V) 	 <p>Distribution of Values for STI -- (-)</p> <p>Considered: 100.0%</p> <p>0.0% < 0.40</p> <p>0.0% > 0.51</p> <p>Avg = 0.424</p> <p>Min = 0.408</p> <p>Max = 0.478</p> <p>Date points : 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:18:29 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. **</p>	 <p>Distribution of Values for Articulation Loss -- (-)</p> <p>Considered: 100.0%</p> <p>0.0% < 11.75%</p> <p>0.0% > 19.25%</p> <p>Avg = 17.21%</p> <p>Min = 12.79%</p> <p>Max = 18.65%</p> <p>Date points : 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:18:44 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd. **</p>

APÊNDICE H - [Grupo B] Variável forma: distribuição dos valores do Índice de Transmissão da Fala (STI) e Porcentagem de Perda na Articulação de Consoantes (%ALCons)

[GRUPO B] VARIÁVEL FORMA: DISTRIBUIÇÃO DOS VALORES DE STI e %ALCons		
DIMENSÃO: 10%		
LOCALIZAÇÃO: 2 Laterais + Central		
FORMA	ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DA FALA (STI)	PORCENTAGEM DE PERDA NA ARTICULAÇÃO DE CONSOANTES (%ALCons)
<p>Quadrada (A10-2L1C-Q)</p> 	<p>Distribution of Values for STI -- (-)</p>  <p>Considered: 100.0% 0.0% < 0.40 0.0% > 0.51</p> <p>Avg = 0.424 Min = 0.412 Max = 0.484 Data points: 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:20:12 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd.™</p>	<p>Distribution of Values for Articulation Loss -- (-)</p>  <p>Considered: 100.0% 0.0% < 11.75% 0.0% > 19.25%</p> <p>Avg = 17.18% Min = 12.41% Max = 18.33% Data points: 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:20:28 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd.™</p>
<p>Horizontal (A10-2L1C-H)</p> 	<p>Distribution of Values for STI -- (-)</p>  <p>Considered: 100.0% 0.0% < 0.39 0.0% > 0.61</p> <p>Avg = 0.431 Min = 0.417 Max = 0.552 Data points: 30381</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:29:10 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd.™</p>	<p>Distribution of Values for Articulation Loss -- (-)</p>  <p>Considered: 100.0% 0.0% < 7.50% 0.0% > 18.50%</p> <p>Avg = 16.58% Min = 8.57% Max = 17.83% Data points: 30381</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:30:12 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd.™</p>
<p>Vertical (A10-2L1C-V)</p> 	<p>Distribution of Values for STI -- (-)</p>  <p>Considered: 100.0% 0.0% < 0.40 0.0% > 0.51</p> <p>Avg = 0.423 Min = 0.404 Max = 0.482 Data points: 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:24:55 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd.™</p>	<p>Distribution of Values for Articulation Loss -- (-)</p>  <p>Considered: 100.0% 0.0% < 11.50% 0.0% > 20.50%</p> <p>Avg = 17.27% Min = 12.54% Max = 19.06% Data points: 30</p> <p>(c) EASE 4.3 / EASE Hall / 08/03/2014 16:25:36 / jolly Proaudio Broadcast Engineering Ltd.™</p>