

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO - PPGAU  
MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO - DEHA

EDUARDO HENRIQUE SILVA

**ATENUAÇÃO DE NÍVEL SONORO MEDIANTE USO DE PAINÉIS  
ABSORVEDORES: ESTUDO DE CASO EM GINÁSIO POLIESPORTIVO  
ESCOLAR**

Maceió

2019

EDUARDO HENRIQUE SILVA

**ATENUAÇÃO DE NÍVEL SONORO MEDIANTE USO DE PAINÉIS  
ABSORVEDORES: ESTUDO DE CASO EM GINÁSIO POLIESPORTIVO  
ESCOLAR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, exigida para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Lúcia Gondim da Rosa Oiticica

Maceió

2019

EDUARDO HENRIQUE SILVA

**ATENUAÇÃO DE NÍVEL SONORO MEDIANTE USO DE PAINÉIS  
ABSORVEDORES: ESTUDO DE CASO EM GINÁSIO POLIESPORTIVO  
ESCOLAR**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, exigida para a obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientadora Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Maria Lúcia Gondim da Rosa Oiticica

Maceió

2019

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

S586a Silva, Eduardo Henrique.  
Atenuação de nível sonoro mediante uso de painéis absorvedores : estudo de caso em ginásio poliesportivo escolar / Eduardo Henrique Silva. – 2019.  
158 f. : il. color.

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, 2019.

Bibliografia: f. 114-121.  
Apêndices: f. 122-153.  
Anexos: f. 154-158.

1. Controle de ruído. 2. Filtros acústicos. 3. Ruído urbano. 4. Ginásios esportivos - Acústica arquitetônica. I. Título.

CDU: 725.81:725.85

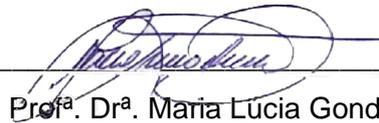
**Folha de Aprovação**

EDUARDO HENRIQUE SILVA

**ATENUAÇÃO DE NÍVEL SONORO MEDIANTE USO DE PAINÉIS  
ABSORVEDORES: ESTUDO DE CASO EM GINÁSIO POLIESPORTIVO  
ESCOLAR**

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.

**APROVADO em 23/11/2018**



Prof.ª. Dr.ª. Maria Lúcia Gondim da Rosa Oiticica (Orientadora)

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

Banca Examinadora:



Prof.ª. Dr.ª. Gianna Melo Barbirato (Examinadora interna)

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)



Prof. Dr. Alexandre Márcio Toledo (Examinador interno)

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Alagoas (UFAL)



Prof.ª. Dr.ª. Bianca Carla Dantas de Araujo (Examinadora externa)

Departamento de Arquitetura , Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Aos meus dois filhos, pois o  
melhor de mim está neles, e neles  
enxergo minha capacidade de evoluir.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu toda a força necessária para enfrentar todos os percalços desta longa etapa e me deu discernimento nos momentos em que me senti só e à minha Mãe (Mary), que me ensinou as bases da vida, de quem herdei inteligência e cultura para vencer esta etapa com segurança, e que está firme hoje saboreando mais esta vitória com muito amor!

À minha esposa-fiel escudeira-amiga-confidente-cúmplice-maravilhosa-linda Núbia, e ao meu filho-amigo-lindo-maravilhoso-forte-bonito-inteligente Eduardo Enrico, que estão comigo desde o início desta jornada na arquitetura. Mas um agradecimento mais que especial vai para meu presentinho de Deus no meio desta etapa de mestrado: minha luz, meu sol: Carolina! O sorriso dela foi o que me fez chegar até aqui!

À Lucinha Oitica, que desde a graduação contribuiu com meu crescimento profissional, ajudou na organização deste trabalho, emprestou livros e equipamentos de medição. Agradeço também à banca examinadora, que se dispôs a apreciar o presente trabalho e contribuir para seu amadurecimento com sugestões valiosas.

À CAPES e à FAPEAL pelas bolsas de estudos, em especial à Prof. Dr<sup>a</sup> Morgana Pitta Duarte, que foi fundamental nesse processo no segundo ano. Agradeço de coração!

A todos que contribuíram direta ou indiretamente na construção deste trabalho, em especial à querida Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Elisabeth Duarte que, docemente, emprestou livros, tirou dúvidas, abrandou meus questionamentos “diretos demais” e me ajudou a entender melhor o que significa a “fase” do mestrado. Também agradeço ao engenheiro / amigo Márcio Azevedo e diretora Silvia pela oportunidade de “dissecar” o objeto de estudo, bem como às diretoras Sandra Toledo e Lourdinha Tenório por permitirem a minha entrada nas outras escolas analisadas.

Um agradecimento em destaque para o professor e amigo Francisco Moura (Instituto de Física – UFAL), que abriu suas portas para um aluno sedento por aprender e que brevemente irá bater em sua porta novamente com mais ideias!

A todos os meus amigos da música e da arquitetura, que investiram em mim através de diversos projetos que desenvolvemos juntos e que estamos fazendo a diferença aqui na nossa cidade! Amigos esses que realmente “me construíram” como profissional nesses dois anos.

E, para fechar com chave de ouro, um agradecimento mais que especial a Emmerich Christiansen, da universidade alemã Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, desenvolvedor do software Noise 3D que, prontamente e surpreendentemente, cedeu acesso a essa fantástica ferramenta de mapeamento de ruído urbano, tirou dúvidas, deu todo o suporte necessário para que o trabalho tivesse consistência nos dados. Inclusive, ampliou a licença para possibilitar a confecção de um último mapa de ruído urbano feito para complementar o trabalho. É de pessoas assim que o mundo precisa! Difusão e acesso a conhecimento dessa forma só é feito por quem tem real prazer em ensinar e o retorno vem naturalmente! Gratidão imensa e fico na expectativa de visitá-lo brevemente.

“Nós somos o que eles superam. Esse é o verdadeiro fardo de todos os mestres”

**(Yoda)**

## RESUMO

Ginásios poliesportivos no Brasil são edificações com extensa variedade plástica em sua arquitetura, podendo ser considerados em diversas cidades como marcos visuais e, em função de seus usos cada vez menos restritos aos esportes, por receberem múltiplas atividades como eventos culturais e feiras, também podem ser considerados marcos sonoros pelo impacto que geram em seu entorno. Uma vez que esses locais possibilitam o acúmulo de pessoas e por também não serem acusticamente tratados para atividades diversas em função da presença predominante de elementos construtivos de baixo coeficiente de absorção acústica em suas superfícies internas e diversas aberturas, o ruído gerado é amplificado e dissipado, causando incômodo na circunvizinhança. O presente trabalho é um estudo de caso que pretende investigar a redução de ruído por absorção mediante o uso de painéis absorvedores no interior de um ginásio poliesportivo escolar na cidade de Maceió. A metodologia adotada baseou-se na investigação das reflexões sonoras dentro do ambiente observando o tempo de reverberação e o  $L_{eq}$  (nível de ruído equivalente) interno e externo, utilizando a base da Acústica Estatística e de diferentes métodos de medições *in situ* importados de normas internacionais para validação do estudo em simulação computacional de Acústica Geométrica e de mapeamento sonoro urbano. Foi definido o uso de painéis sonoabsorventes com NRC fixo de 74% distribuídos nas superfícies internas (paredes e teto) do objeto de estudo, onde foi possível a análise de 20 arranjos, definidos em uma matriz para simulação visando a mais eficiente combinação. Dentre todos os arranjos, o de maior capacidade de redução de ruído global atingiu 8,4dB. Portanto, a técnica de redução de ruído por absorção mostrou-se capaz de diminuir o nível de ruído gerado pelas reflexões sonoras dentro do ginásio, atenuando a fuga do som à circunvizinhança através de suas aberturas e permitindo, ainda, a adoção de estratégias construtivas que atendam ambientes climatizados naturalmente.

Palavras-chave: Atenuação de ruído, absorção, ginásio poliesportivo escolar

## **ABSTRACT**

Multisports gyms in Brazil are buildings with extensive plastic variety in their architecture, which can be considered in several cities as visual references and, due to their use not only restricted to sports, for receiving multiple activities such as cultural events and fairs, these places influences on soundscapes due to the sound impact they generate in their surroundings. Once these places allows people accumulation and also because they are not acoustically treated for different activities due to the predominant presence of building elements with low acoustic absorption on their internal surfaces and various openings, the noise generated is amplified and dissipated, causing discomfort in the surrounding area. This work is a case study that intends to investigate noise reduction by absorption through the use of absorber panels inside a school sports gym in Maceió city. The methodology was based on the investigation of sound reflections in the environment, observing the reverberation time and the internal and external  $L_{eq}$  (equivalent noise level), using the basis of Statistical Acoustics and different methods of in situ measurements imported from international standards and comparison with computational simulation of Geometric Acoustics and urban sound mapping. Sound absorbing panels with fixed NRC of 74% were distributed on the internal surfaces (walls and ceiling) of the selected gym, where it was possible to analyze 20 arrangements, defined in a matrix for simulation aiming at the most efficient combination. Among all the arrangements, the one with the greatest global noise reduction capacity reached - 8.4dB. Therefore, the noise reduction technique by absorption proved to be able to decrease the level of noise generated by the sound reflections inside the gym, attenuating the escape of sound to the surrounding area through its openings and also allowing the adoption of constructive strategies that cater to naturally acclimatized environments.

**Keywords:** Noise attenuation, absorption, school sports gym

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Absorção, reflexão e transmissão do som .....	9
Equação 2: Redução de ruído por absorção.....	28
Equação 3: Diferença de nível de pressão sonora captado pelo nível de potência sonora emitido.....	29
Equação 4: Distância fonte - microfone.....	64
Equação 5: Impedância acústica .....	123
Equação 6: Intensidade sonora máxima .....	124
Equação 7: intensidade sonora por unidade de área.....	124
Equação 8: Nível de intensidade sonora.....	125
Equação 9: Nível de pressão sonora.....	126
Equação 10: Pressão sonora.....	126
Equação 11: Nível de pressão sonora em função da distância.....	126
Equação 12: Absorção total (A).....	138
Equação 13: Índice de absorção ( $\bar{\alpha}$ ).....	138
Equação 14: Tempo de reverberação (Sabine).....	139
Equação 15: Tempo de reverberação (Eyring).....	141
Equação 16: Diferença de nível (D).....	142
Equação 17: Nível de pressão sonora equivalente ponderado em A. ( $L_{Aeq}$ ).....	143
Equação 18: Nível de pressão sonora equivalente ( $L_{eq}$ ) médio.....	143
Equação 19: Coeficiente de transmissão sonora de um material.....	143
Equação 20: Índice de redução sonora.....	144
Equação 21: Índice de redução sonora através da densidade de um material.....	144

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ginásios poliesportivos marcantes no contexto urbano.....	8
Figura 2: Comportamento do som ao encontrar um obstáculo.....	9
Figura 3: Campo livre e campo reverberante.....	10
Figura 4: Componentes construtivos encontrados em ginásios poliesportivos.....	11
Figura 5: NCA – em dB(A) – para ambientes externos.....	14
Figura 6: Valores dB(A) e NC apresentados na NBR 10.152.....	16
Figura 7: Curvas NCB.....	17
Figura 8: Projeto e construção de quadra poliesportiva – modelo FNDE .....	22
Figura 9: Guia de implantação de ginásio poliesportivo inglês.....	23
Figura 10: Iluminação natural e programa de necessidades.....	24
Figura 11: Detalhamentos construtivos diversos.....	25
Figura 12: Relação entre redução de ruído e absorção no ambiente.....	29
Figura 13: Equipamentos usados em medições <i>in situ</i> .....	32
Figura 14: Representação gráfica do sinal <i>sweep sine</i> .....	33
Figura 15: Gráfico de resposta acústica instantânea de uma sala qualquer .....	34
Figura 16: Gráfico de decaimento.....	34
Figura 17: Gráfico de cascata.....	35
Figura 18: Gráfico de espectrograma.....	35
Figura 19: Gráfico de tempo de reverberação (T30).....	36
Figura 20: Gráficos gerados pelos <i>softwares</i> dBTrait 5.4 e dBbati32.....	36
Figura 21: Padrão internacional de cores para NPS em mapas de ruído.....	38
Figura 22: Simulação computacional gerada pelo <i>software</i> EASE 4.3.....	39
Figura 23: Gráfico de resposta acústica gerado pelo <i>software</i> EASE 4.3.....	39

Figura 24: Simulação computacional gerada pelo <i>software</i> Noise3D.....	40
Figura 25: Estrutura da metodologia.....	43
Figura 26: Planta de locação e coberta.....	46
Figura 27: Fachadas da escola A.....	47
Figura 28: Panorama do entorno da escola A.....	47
Figura 29: Circunvizinhança do objeto de estudo.....	48
Figura 30: Festividades, treinamentos e eventos esportivos no objeto de estudo.....	49
Figura 31: Planta baixa.....	50
Figura 32: Cortes AA', BB', CC' e DD'.....	51
Figura 33: Tempo ótimo de reverberação para o objeto de estudo, em 500Hz.....	53
Figura 34: Conexão dos itens.....	58
Figura 35: Medições: umidade do ar e temperatura (a) calibração (b) e medição de ruído residual (c).....	59
Figura 36: Altura da fonte sonora e do microfone em relação ao piso.....	64
Figura 37: Posições emissor – receptor – fase 1 – MEDIÇÃO INTERNA.....	66
Figura 38: Processo de medição de Leq médio - F1, P1–F1.....	67
Figura 39: Posições emissor - receptor – fase 2 – MEDIÇÕES INTERNA E EXTERNA.....	70
Figura 40: Processo de medição de D. F1, P1-F1 <sup>2</sup> e P1-F1, respectivamente.....	71
Figura 41: 3D do objeto de estudo – Sketchup e EASE 4.3, respectivamente.....	73
Figura 42: Objeto de estudo modelado pronto para simulação de F1.....	73
Figura 43: Aplicação do método do raio traçado no modelo 3D.....	74
Figura 44: Mapeamento do campo direto isolado (esq.) e do campo direto + difuso (dir.).....	74
Figura 45: Parcela do entorno do objeto de estudo.....	76

Figura 46: Parcela do entorno do objeto de estudo.....	76
Figura 47: Modelo 3D para mapeamento sonoro feito a partir de ferramenta de geolocalização.....	77
Figura 48: Fonte e receptores – Etapa 2 das medições <i>in situ</i> .....	78
Figura 49: Mapa de ruído do entorno do objeto de estudo SEM ATIVIDADES.....	79
Figura 50: Mapa de ruído do entorno do objeto de estudo SEM / COM ATIVIDADES.....	92
Figura 51: Expectativa de redução de ruído (RR) de acordo com a fórmula de Egan (2000).....	94
Figura 52: Expectativa de redução de ruído de acordo com a fórmula de Gerges (1992).....	94
Figura 53: Ábaco com expectativa de redução de ruído de acordo com a fórmula de Gerges (1992).....	95
Figura 54: Mapeamento dos NPS (em dB) em função do ligamento de 3 fontes sonoras simultâneas presente no arranjo 18.....	97
Figura 55: Combinações possíveis de arranjos das superfícies sonoabsorventes no interior do objeto de estudo.....	98
Figura 56: Visualização das combinações possíveis de arranjos das superfícies sonoabsorventes no interior do objeto de estudo.....	98
Figura 57: Decodificação da nomenclatura definida na matriz.....	99
Figura 58: Mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação.....	104
Figura 59: Perspectiva do mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação.....	105
Figura 60: Mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação sem a influência do tráfego das principais vias do recorte urbano.....	106

Figura 61: Perspectiva do mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação sem a influência do tráfego das principais vias do recorte urbano.....	109
Figura 62: Propagação do som.....	125
Figura 63: Atenuação do campo sonoro livre em função da distância da fonte sonora. ....	127
Figura 64: NPS e a relação com a diretividade (Q) da fonte sonora em situação real.....	128
Figura 65: NPS e a relação entre os campos livre e reverberante.....	129
Figura 66: Valores de potência sonora de fontes e níveis de pressão sonora captados por equipamentos de medição e sistema auditivo.....	130
Figura 67: Gráficos de análise espectral acústica.....	131
Figura 68: Curvas isofônicas.....	133
Figura 69: Curvas dos filtros de ponderação sonora por frequência mais utilizadas.....	133
Figura 70: Planos de escuta.....	134
Figura 71: Variação de NPS, potência e percepção do sistema auditivo humano.....	135
Figura 72: Faixa de atuação de frequências e amplitude da fala humana e da música.....	135
Figura 73: Coeficientes de absorção acústica ( $\alpha$ ) e seus efeitos.....	138
Figura 74: Tempo ótimo de reverberação em função do volume do ambiente para 500Hz.....	140
Figura 75: Diferença de nível entre ambientes (partições).....	142
Figura 76: Localização das escolas no mapa parcial de Maceió-AL.....	146
Figura 77: Vista em satélite da escola A, do ginásio e vias.....	147
Figura 78: Fachadas do ginásio da escola A.....	148

Figura 79: Medições interna e externa – Escola A.....	148
Figura 80: Vista em satélite do colégio B e seu ginásio.....	149
Figura 81: Fachadas do ginásio da escola B.....	149
Figura 82: Medições interna e externa – Ginásio da escola B.....	150
Figura 83: Vista em satélite da escola C e do ginásio.....	150
Figura 84: Vistas internas da escola C e do ginásio.....	151
Figura 85: Medições interna e externa – Escola C.....	151

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1: Características de pisos de ginásios em função de sua tipologia.....	12
Tabela 2: Classificação de ginásios poliesportivos escolares e não-escolares.....	12
Tabela 3: Comparação de valores das curvas NR 40 e NC 40.....	26
Tabela 4: Descrição da metodologia.....	44
Tabela 5: Áreas das superfícies internas, área total e volume da quadra.....	51
Tabela 6: Coeficientes de absorção acústica ( $\alpha$ ) dos materiais da quadra.....	52
Tabela 7: TR do objeto de estudo segundo a abordagem estatística.....	54
Tabela 8: Fases dos procedimentos de medições acústicas <i>in situ</i> .....	56
Tabela 9: Equipamentos utilizados nas medições acústicas.....	57
Tabela 10: Normas complementares que nortearam a obtenção de Leq global.....	62
Tabela 11: Nomenclaturas adotadas para a identificação dos dados obtidos na metodologia – Fase 1.....	67
Tabela 12: Nomenclaturas adotadas para a identificação dos dados obtidos na metodologia – Fase 2.....	71
Tabela 13: Levantamento das vias do entorno do objeto de estudo.....	78
Tabela 14: Tempo de reverberação calculado, medido e simulado.....	82
Tabela 15: valores de Leq por frequência e global, medidos e simulados.....	84
Tabela 16: valores de Leq global medido e simulado – Fase 2 / Etapa 4.....	86
Tabela 17: NPS (em dB) por frequência e níveis de ruído globais do objeto e das curvas NC para ginásios poliesportivos.....	108
Tabela 18: levantamento arquitetônico e acústico dos 3 ginásios selecionados.....	152
Tabela 19: Valores das curvas NC e NR obtidos X Valores recomendados.....	152

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: TR encontrado e TR ótimo por frequências e suas tolerâncias.....	55
Gráfico 2: TRs ótimo, calculado, medido e simulado.....	83
Gráfico 3: Resultados de Leq utilizando os métodos de medição descritos.....	85
Gráfico 4: Leq obtido em múltiplos métodos de medições – Fase 2 / Etapa 4.....	87
Gráfico 5: Leq obtido em 3 métodos de medições no exterior do ginásio.....	88
Gráfico 6: Leq obtido em 3 métodos de medições no interior do ginásio.....	90
Gráfico 7: TR antes e depois da aplicação de painéis com lã de vidro.....	93
Gráfico 8: NPS para cada um dos arranjos do grupo 1 da matriz.....	100
Gráfico 9: NPS para cada um dos arranjos do grupo 2 da matriz.....	101
Gráfico 10: NPS para cada um dos arranjos do grupo 3 da matriz.....	102
Gráfico 11: NPS dos melhores arranjos de cada um dos 3 grupos da matriz.....	103
Gráfico 12: Valores de Leq pós-simulação com arranjo T75D25 confrontados com valores simulados nas etapas de diagnóstico.....	109
Gráfico 13: Curvas NR das 3 escolas.....	153

## SUMÁRIO

RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	X
LISTA DE EQUAÇÕES .....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XII
LISTA DE QUADROS E TABELAS .....	XVII
LISTA DE GRÁFICOS.....	XVIII
SUMÁRIO.....	XIX
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivos .....	6
1.2. Estrutura da dissertação.....	6
<b>2. ARQUITETURA E ACÚSTICA DE GINÁSIOS POLIESPORTIVOS.....</b>	<b>8</b>
2.1. Características arquitetônicas e acústicas gerais de ginásios poliesportivos.....	11
2.2. Normas brasileiras de acústica aplicáveis a ginásios poliesportivos e o contexto urbano da cidade de Maceió-AL .....	13
2.2.1. NBR 10.151:2000.....	14
2.2.2. NBR 10.152:2017.....	16
2.2.3. O EIV, os estudos de impacto sonoro em Maceió e NBR 15.575:2013. ...	19
2.3. Parâmetros arquitetônicos de ginásios poliesportivos escolares brasileiros .....	21
2.4. Parâmetros arquitetônicos e acústicos de guias e normas internacionais	23
2.5. Estratégias de controle de ruído em ginásios poliesportivos de clima quente e úmido.....	27
2.5.1. Redução de ruído por absorção .....	27
2.6. Descrição de <i>softwares</i> de acústica disponibilizados.....	30
2.6.1. Softwares de medição acústica <i>in situ</i> .....	31
a) Room EQ Wizard (REW) .....	32
b) dBbati 32 e dBTrait 5.4.....	36
2.3.2. Simulação computacional .....	37
a) EASE 4.3 .....	38
b) Noise 3D.....	40
2.7. Observações principais do capítulo.....	41

<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. Etapa 01 – Seleção e caracterização do objeto de estudo .....</b>	<b>45</b>
3.1.1. Contexto urbano.....	46
3.1.2. O impacto sonoro na circunvizinhança .....	48
<b>3.2. Etapa 02 – Levantamento de dados arquitetônicos .....</b>	<b>49</b>
<b>3.3. Etapa 03 – Levantamento de dados acústicos estatísticos.....</b>	<b>52</b>
3.3.1. Tempo ótimo de reverberação .....	53
3.3.2. Cálculo de A, $\bar{a}$ e TR – Situação original .....	54
<b>3.4. Etapa 04 – Medições acústicas <i>in situ</i> .....</b>	<b>55</b>
3.4.1. Equipamentos utilizados e suas conexões .....	57
3.4.2. Fase 1 – Medição do TR e Leq global interno .....	58
a) Horário, condições climáticas, ruído residual e calibração .....	58
b) Justificativa da escolha do método de medição de TR.....	59
c) Justificativa da escolha dos métodos de medição de Leq global.....	61
d) Alocação de emissores e receptores para a obtenção de TR e Leq global ...	63
e) Procedimento de medição de TR e Leq global.....	65
f) Nomenclatura dos dados obtidos para TR e Leq global.....	67
3.4.3. Fase 2 – Medição de Diferença de NPS (D) – INTERNO E EXTERNO ..	68
a) Horário, condições climáticas, ruído residual e calibração .....	68
b) Justificativa da escolha dos métodos de medição de D .....	68
c) Alocação de emissores e receptores para a obtenção de D.....	69
d) Procedimento de medição de D .....	69
e) Nomenclatura dos dados obtidos para D .....	71
<b>3.5. Etapa 05 – Acústica Geométrica e mapeamento sonoro .....</b>	<b>72</b>
3.5.1. Simulação da emissão sonora dentro do objeto de estudo (fase 1) a partir do uso do <i>software</i> EASE 4.3 .....	72
3.5.2. Simulação da emissão sonora dentro do objeto de estudo / investigação externa: utilização do <i>software</i> Noise 3D. ....	75
a) Procedimentos de montagem do cenário para simulação .....	76
b) Procedimento de inclusão de dados das vias e das edificações .....	77
<b>3.6. Observações principais do capítulo.....</b>	<b>79</b>
<b>4. ANÁLISE E DIAGNÓSTICO.....</b>	<b>81</b>
<b>4.1. Etapa 06 – Análise de dados para validação da simulação .....</b>	<b>82</b>
4.1.1. Tempo de Reverberação.....	82

4.1.2. Leq global interno.....	84
4.1.3. Diferença de NPS (D) – Leq interno e externo .....	86
a) Medições no exterior do objeto de estudo.....	87
b) Medições no interior do objeto de estudo.....	89
4.1.4. Representação em mapa de ruído urbano .....	91
<b>4.2. Parâmetros acústicos estatísticos .....</b>	<b>92</b>
4.2.1. Tempo de Reverberação (TR) – Proposta definida em cálculo .....	93
4.2.2. Redução de ruído por absorção – Proposta definida em cálculo.....	94
<b>4.2. Matriz e simulação computacional.....</b>	<b>95</b>
<b>4.3. Apresentação dos dados e representação no mapa de ruído urbano... 100</b>	
<b>4.4. Observações principais do capítulo..... 109</b>	
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 111</b>	
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>114</b>
<b>APÊNDICE 1 – FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA..... 122</b>	
<b>A1.1. Conceitos físicos do som..... 123</b>	
A1.1.1. Impedância acústica .....	123
A1.1.2. Intensidade, pressão e diretividade sonora.....	124
A1.1.3. Níveis sonoros, frequência e percepção do sistema auditivo humano	129
<b>A1.2. Controle de ruído no ambiente construído .....</b>	<b>136</b>
A1.2.1. Parâmetros de condicionamento acústico.....	137
a) Absorção total (A) e índice médio de absorção (ā).....	137
b) Tempo de Reverberação (TR) – Equação de Sabine e de Eyring.....	139
A1.2.2. Parâmetros de isolamento acústico de ruído aéreo .....	141
a) Diferença de Nível entre ambientes (D) ou Redução de Ruído (NR) .....	142
b) Perda de Transmissão Sonora (TL) ou Índice de Redução Sonora (R) .....	143
<b>A1.3. Considerações finais do apêndice 1..... 145</b>	
<b>APÊNDICE 2 – ESTUDO DE REPERTÓRIO EM ARQUITETURA E ACÚSTICA DE GINÁSIOS ESCOLARES EM MACEIÓ .....</b>	<b>146</b>
<b>A2.1. Ginásio poliesportivo da escola A .....</b>	<b>147</b>
<b>A2.2. Ginásio poliesportivo do colégio B .....</b>	<b>149</b>
<b>A2.2. Ginásio poliesportivo da escola C..... 150</b>	
<b>A2.3. Curvas NC e NR do levantamento realizado nos 3 ginásios..... 152</b>	
<b>A2.4. Considerações finais do apêndice 2..... 153</b>	
<b>APÊNDICES 3 a 7 – COMPILAÇÃO DE IMAGENS E GRÁFICOS..... 154</b>	



## 1. INTRODUÇÃO

Arquitetura é, em síntese, a técnica e a arte de planejar espaços para atividades humanas (adaptado de MICHAELIS, 2018) e a acústica arquitetônica está presente na humanidade desde o seu início: das cavernas às primeiras cabanas em palha; de pequenas casas a grandes palácios e anfiteatros, todos esses espaços destinados ao abrigo, ao convívio, à comunicação e ao desenvolvimento do ser humano em sociedade (LONG, 2006).

Diante disso, para assegurar que locutores e interlocutores da antiguidade fossem compreendidos nos ambientes construídos, ou não fossem escutados em salas de reuniões secretas, diversas técnicas eram desenvolvidas empiricamente por meio das noções sobre a relação entre o som e sua propagação através dos movimentos de compressão do ar, líquidos e sólidos, a exemplo dos coliseus e teatros gregos, onde projeção da voz era garantida pela forma arquitetônica, ou grandes blocos de pedra e barro que garantiam a privacidade nas residências dos povos da era clássica (LONG, 2006).

Com os avanços científicos, a acústica arquitetônica ficou mais esclarecida a partir do final do século XIX graças aos estudos de W. Sabine, Helmholtz e Rayleigh (BRANDÃO, 2016), recebendo grande contribuição do campo da física para a avaliação dos fenômenos sonoros e o tratamento acústico do ambiente construído, englobando o condicionamento e o isolamento acústicos. Portanto, a acústica arquitetônica moderna é considerada uma ciência nova.

O condicionamento acústico é o processo de controle dos fenômenos sonoros resultantes das reflexões do som nas superfícies internas de um ambiente qualquer. Fenômenos como reverberação, eco, ondas estacionárias e outros fazem parte do campo sonoro difuso, afastado da fonte sonora (campo sonoro direto), gerando consequências na audibilidade no interior do recinto (EVEREST, 2001). O isolamento acústico abrange estratégias construtivas de controle do ruído que acessa a edificação ou evade dela através do ar ou de suas estruturas (HOPKINS, 2007).

Os estudos em acústica recebem a devida atenção na Europa (SPORTS ENGLAND, 2012) e em países de primeiro mundo de outros continentes, onde normas técnicas e pesquisas são realizadas com o intuito de desenvolver materiais

adequados ao tratamento acústico de ambientes, técnicas de medição e mapeamento de ruído urbano, equipamentos e tecnologias cada vez mais avançadas para diagnosticar as características do ruído que interfere na comunicação e no convívio social. Destarte, é mais fácil encontrar arquitetura com adequação acústica nesses locais, embora ainda existam problemas dessa natureza em diversas construções (CONETTA, ET AL. 2003).

No Brasil, as primeiras normas relacionadas a níveis de ruído adequados às edificações datam de 1987, com as NBRs 10.151 e 10.152 (ABNT, 1987), que apresentam diretrizes para controle de ruído e isolamento acústico de ambientes, onde juntamente à NBR 12.179 (ABNT,1992), que trata sobre condicionamento acústico interno de diversas tipologias de construções, indicam que esse enfoque é ainda mais recente no país.

Paixão (2002) afirma que a indústria da construção civil brasileira continua a executar imóveis acusticamente inadequados e não fornecem dados a respeito do desempenho acústico das edificações, consequência da não inclusão de estratégias de conforto acústico em fase de projeto, pois é muito comum a procura de profissionais especializados em acústica para corrigirem problemas de ruído ocasionados por essas estratégias não serem aplicadas no momento oportuno.

Reflexo disso é a insatisfação de proprietários de edificações habitacionais por não conseguirem sentir privacidade no próprio lar. Os avanços foram iniciados com a aprovação da NBR 15.575 (ABNT, 2013), que entrou em vigor com a finalidade de adequar o desempenho das construções em diretrizes construtivas que garantam a qualidade estrutural, hidrossanitária e o conforto ambiental em diversas áreas: iluminação, térmica e acústica de edifícios verticais. As mudanças ocorrem gradativamente, e os desafios para a implementação de requisitos mínimos de desempenho para padronizar as construções demandam paciência e já estão nascendo dos projetos arquitetônicos (SINDUSCON, 2015).

A mesma falta de atenção ocorre com o condicionamento acústico, onde diversos estudos brasileiros mostram que igrejas (OLIVEIRA, 2017), ginásios poliesportivos (RODRIGUES, 2008), escolas (SILVA, 2014), salas adaptadas para música (CARBONI, 2012) e diversos outros ambientes não são favorecidos com boa qualidade acústica interna, isso se reflete em prejuízo à inteligibilidade (compreensão)

do som produzido e, conseqüentemente, a eficiência na comunicação entre locutores e interlocutores. Diante dessas situações relacionadas ao som e ao ambiente construído tanto na esfera brasileira quanto mundial, a OMS (Organização Mundial da Saúde) declarou que a poluição sonora é o segundo maior problema ambiental no mundo como agente de causador de doenças ao ser humano, após ultrapassar a poluição da água e perdendo apenas para a poluição da atmosfera (SENADO FEDERAL, 2012).

Para mudar esse quadro, há várias maneiras de otimizar a qualidade acústica de ambientes construídos. O uso de materiais para condicionamento acústico proporciona inteligibilidade na comunicação vocal, clareza da música reproduzida, conforto e bem-estar ao usuário em função da diminuição do nível de pressão sonora global nos recintos. Materiais com características duras e densas refletem o som, enquanto materiais fibrosos e macios o absorvem (MEHTA *et al*, 1999). Para garantir o isolamento acústico, paredes, esquadrias, pisos e forros com maior densidade e vedação adequada garantem satisfatória redução de ruído entre ambientes (COOPER, 1996).

Egan (2000) afirma que é possível reduzir o nível de pressão sonora em uma edificação utilizando apenas materiais de baixa densidade e alto coeficiente de absorção sonora sobre suas superfícies internas. Gerges (1992) também apresenta cálculos e estratégias para redução de ruído do campo difuso de forma eficiente através de sistemas absorvedores, capazes de diminuir a amplificação sonora gerada dentro de ambientes construídos. Por outro lado, Brandão (2016) alerta que a redução de ruído por absorção se dá no campo sonoro difuso e ajuda no controle da transmissão sonora entre recintos adjacentes, mas que não deve ser substituída por um bom projeto de isolamento acústico. Tais pressupostos motivaram o aprofundamento na investigação das características de materiais sonoabsorventes na redução do ruído de edificações, pois para cada caso, há uma estratégia, ou um conjunto de estratégias mais adequadas para que o funcionamento do recinto não seja desconfigurado em função de uma intervenção construtiva.

Ginásios poliesportivos possuem características marcantes nas cidades, tanto do ponto de vista arquitetônico quanto acústico. De acordo com Rodrigues (2008), além do destaque de alguns ginásios relacionados à plasticidade formal e estética de

sua arquitetura, que os configuram como símbolos urbanos, sua funcionalidade esportiva foi estendida a outros usos como eventos musicais, formaturas, entre outras atividades, marcando-os também como agentes da paisagem sonora urbana, interferindo no impacto de vizinhança.

A tipologia construtiva comum de ginásios poliesportivos brasileiros segue um padrão: uso de estruturas metálicas ou em concreto, fechamento em alvenaria simples, telhas metálicas ou de fibrocimento e grandes aberturas (BRUAND, 2005) para proporcionar ventilação natural cruzada, uma vez que a instalação de equipamentos de climatização não são considerados ainda viáveis economicamente nesse tipo de construção.

Com o uso de materiais com essas características descritas anteriormente, não se consegue adequar a edificação tanto para o isolamento, quanto para o condicionamento acústico, pois as aberturas e os materiais empregados nas construções de ginásios não possuem elevada densidade para controlar transmissão sonora e têm baixa capacidade de absorção sonora para evitar as reflexões do som, que amplificam o ruído interno gerado no local quando em funcionamento.

Tais características construtivas somadas à polivalência de atividades nesses espaços os configuram como grande agente de impacto sonoro em vizinhanças gerando problemas que alcançam a esfera judicial. Dessa forma, em ocasiões de práticas de esportes, festas e eventos em geral, a pressão sonora gerada em ginásios poliesportivos é amplificada pelas reflexões nas faces internas, criando o campo sonoro difuso ruidoso (BRUEL & KJAER, 2005) e evadem pelas aberturas com intensidade ainda maior para a vizinhança, gerando incômodo e a sensação de que o ruído produzido nesse ambiente é maior do que realmente é.

Portanto, o desafio está em encontrar um ponto de equilíbrio no uso de painéis sonoabsorventes para a contenção do ruído gerado dentro de ginásio poliesportivo sem modificar sua construção original, sem prejudicar a ventilação natural cruzada e a incidência de iluminação natural em ginásios. Oiticica (2010) mostra que peitoris ventilados com materiais acústicos absorvedores trazem significativas contribuições à redução de ruído respeitando essas características.

Assim, o objetivo desta dissertação é investigar a redução de ruído por absorção mediante uso de painéis absorvedores acústicos tendo como estudo de caso um ginásio poliesportivo na cidade de Maceió-AL. Esse estudo visa entender a contribuição da redução de ruído do campo difuso do objeto de estudo, relacionando-os às exigências dadas à acústica em normas técnicas e legislações.

O presente estudo pretende também estimular e enfatizar problemas de acústica em Planos Diretores e em regras que regulamentam os EIVs (Estudos de Impacto de Vizinhança), para que sejam considerados com mais rigor os procedimentos de medição definidos em normas para a qualificação dos laudos referentes à poluição sonora de edificações, bem como o reforço às normas técnicas que determinam níveis adequados de desempenho acústico em edificações.

Neste trabalho, foram utilizados *softwares* para cálculos estatísticos, medições acústicas, simulações de condicionamento acústico, nível de ruído equivalente ( $L_{eq}$ ) e mapeamento sonoro urbano. Dessa forma, foi possível cruzar os dados de NPS (nível de pressão sonora) obtidos das medições acústicas com os dados das simulações computacionais. Isso permitiu a interpretação qualitativa dos dados por comparação, correlacionando diferentes metodologias teóricas e práticas avaliando as variáveis para uma correta interpretação dos fenômenos acústicos ocorridos no objeto de estudo para, assim, escolher os mais eficientes arranjos de posicionamento dos painéis sonoabsorventes em suas superfícies internas.

O material escolhido para os painéis foi a lã de vidro, por ser um produto acessível e de alto NRC – coeficiente de redução de ruído (74%), e o fato desses painéis estarem afastados se dá por conta de uma maior eficiência na absorção do material quando é implantado a certa distância de paredes e forros (MEHTA *et al*, 1999). Os conceitos de isolamento acústico são apresentados para que seja possível entender a indissociabilidade entre condicionamento e isolamento do som defendida por Fahy (1997) , uma vez que as causas de que diminuem a qualidade do condicionamento acústico amplificam o ruído gerado dentro de um ambiente, interferindo em seu isolamento.

Entretanto, é importante esclarecer que o limite da dissertação é a simulação computacional das combinações de painéis nas paredes e no teto do objeto de estudo para a compreensão do que ocorre no mesmo. O foco do trabalho é eminentemente

em acústica arquitetônica com ligeiras citações sobre as outras naturezas de conforto ambiental (ventilação e iluminação natural) com a finalidade de mostrar a importância da compatibilização entre estas outras áreas de planejamento na construção civil.

## **1.1. Objetivos**

### **Geral**

Investigar a redução de ruído por absorção mediante uso de painéis absorvedores tendo como estudo de caso um ginásio poliesportivo na cidade de Maceió-AL.

### **Específicos**

- Investigar a existência de uma relação entre os efeitos do condicionamento acústico na redução sonora de ambientes ruidosos que não possam ser isolados em função de suas características arquitetônicas e de uso;
- Aprofundar os conhecimentos de normas nacionais e internacionais sobre ruído em ginásios poliesportivos;
- Avaliar a confiabilidade de dados obtidos em cálculos teóricos, medições acústicas e simulações computacionais com diferentes testes de métodos e equipamentos;

## **1.2. Estrutura da dissertação**

O trabalho está organizado em seis capítulos, sendo o capítulo 1 referente à Introdução, delimitando o tema, apresentando a problemática que o envolve, justificativas e objetivos da dissertação.

O capítulo 2 compreende o embasamento teórico usando conceitos sobre os fundamentos da acústica e seus parâmetros. Nele, serão apresentadas normas brasileiras de acústica, diretrizes dadas à poluição sonora no Plano Diretor de Maceió e EIVs (Estudos de Impacto de Vizinhança), mostrando um estudo de repertório de ginásios poliesportivos no Brasil e no exterior, destacando referências relacionadas a ginásios poliesportivos nessas normas.

O capítulo 3 engloba a metodologia do trabalho, partindo da justificativa da seleção do objeto de estudo (ginásio poliesportivo da escola “A” em Maceió-AL), dos parâmetros acústicos pertinentes à análise e apresenta os levantamentos arquitetônicos e acústicos, detalhando todos os processos metodológicos realizados com a finalidade de justificar a aplicação da simulação computacional para a avaliação dos painéis sonoabsorventes responsáveis pela redução de ruído.

O capítulo 4 trata da Análise e Diagnóstico de arranjos de painéis absorvedores acústicos no objeto de estudo. Em seguida, é apresentada análise quantitativa e qualitativa dos parâmetros acústicos (TR e  $L_{eq}$  global), com o uso da Acústica Geométrica por simulação computacional, onde foi possível afirmar qual a melhor distribuição dos painéis para a maior redução de energia acústica no interior do recinto.

Por fim, o Capítulo 5, apresenta as considerações finais baseadas nas análises do capítulo 4, apresentando as limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

O apêndice 1 apresenta todos os conceitos físicos de acústica pertinentes à compreensão mais aprofundada dos assuntos tratados ao longo da dissertação, servindo como um guia técnico para o esclarecimento de todos os capítulos.

O apêndice 2 traz um levantamento arquitetônico e acústico de três ginásios poliesportivos maceioenses, finalizando com uma comparação entre o desempenho dos mesmos. Este estudo detemrinou a escolha do objeto de estudo.

Os apêndices 3 ao 7 são compilações, em folha A3, das imagens mais importantes relacionadas à metodologia e à síntese dos resultados. Pode ser destacado, a gosto do leitor, para facilitar a visualização de dados que são frequentemente referenciados ao longo dos capítulos.

## 2. ARQUITETURA E ACÚSTICA DE GINÁSIOS POLIESPORTIVOS

A grande variedade na plasticidade formal da arquitetura de ginásios poliesportivos configura esses locais, inicialmente, como grandes marcos visuais no contexto urbano. Há espaços poliesportivos de diversos tamanhos que tornam-se grandes referenciais em cidades, a exemplo do Ginásio Nilson Nelson em Brasília – Brasil (fig. 1, a), e o Ericsson Globe em Estocolmo – Suécia (fig. 1, b). Bruand (2005) aponta que estruturas esbeltas, materiais leves e forma plástica delicada, em função das atualizações tecnológicas de construção, trouxeram novas concepções formais aos ginásios, principalmente na cobertura, tanto para ginásios profissionais, quanto para ginásios escolares.

**Figura 1:** Ginásios poliesportivos marcantes no contexto urbano.



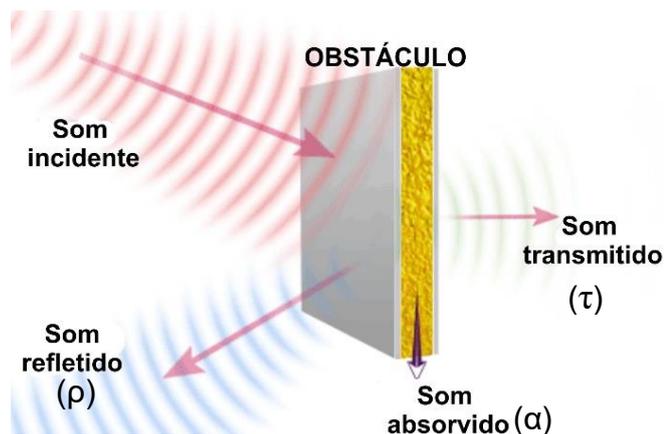
Fonte: Adaptado de UNCYC, BLOGSPOT, WIWIBLOGGS e FOOTAGE.FRAMEPOOL (2018).

Uma vez que materiais leves e rígidos, que possuem baixo coeficiente de absorção acústica que atuam como refletores sonoros (BISTAFA, 2011), sejam empregados em locais volumosos como ginásios poliesportivos, fenômenos no campo sonoro difuso são constatados imediatamente, como alto tempo de reverberação e consequência disso é a dificuldade na compreensão do som reproduzido nesses locais (RODRIGUES, 2008) e a amplificação de ruído gerado internamente. Esse ruído é, comumente, caracterizado como um incômodo à circunvizinhança,

caracterizando-a, também, como um marco sonoro e é este componente o foco de análise do presente estudo.

Quando uma fonte sonora qualquer é ativada e encontra um obstáculo, uma série de fenômenos acústicos ocorrem por conta da propriedade do som ser absorvido ou refletido de acordo com a característica física do material presente na superfície desse obstáculo (BISTAFA, 2011). A parcela restante dessa interação, capaz de atravessá-lo, é caracterizada como som transmitido (figura 2).

**Figura 2:** Comportamento do som ao encontrar um obstáculo.



Fonte: Adaptado de Valle (2006) e Bruel e Kjaer (1978).

Em síntese, quando uma onda sonora (emissor) colide em uma superfície, parte é **absorvida** (*alfa* “ $\alpha$ ”), parte é **refletida** (*rho* “ $\rho$ ”) e a parte final é **transmitida** (*tau* “ $\tau$ ”). Em um meio físico ideal, onde só exista a energia sonora e um único obstáculo, a relação dessas três interações é igual à energia da onda originada (MEHTA *et al*, 1999).

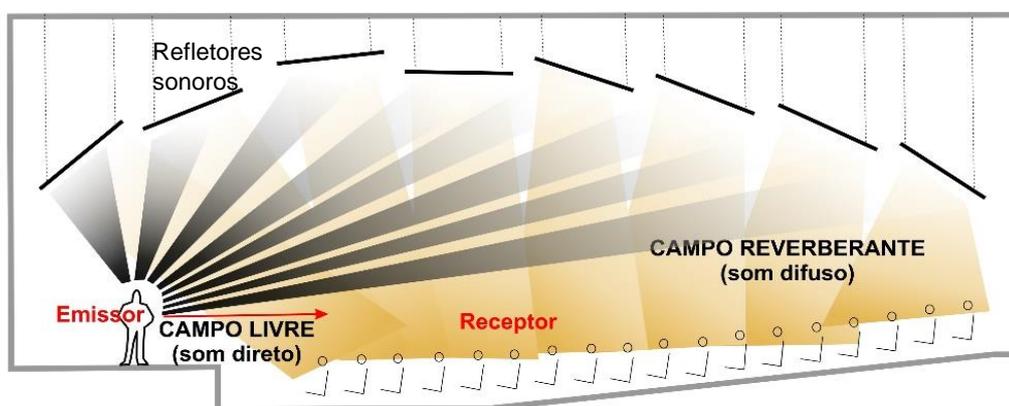
$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{Equação 1})$$

O resultado prático da fórmula anterior, aplicada em uma situação real, onde a fonte foi acionada em uma sala por exemplo, indica que o ouvinte, dentro desse recinto, percebe o som de duas maneiras: direto e refletido. O primeiro é oriundo da fonte sonora propriamente dita – som direto; e o segundo resultante da fonte sonora acrescido do reforço acústico proporcionado pelas reflexões do som nos materiais das superfícies internas da sala – som difuso – (VALLE, 2006).

Assim, são caracterizados os campos sonoros livre (ou campo direto) e reverberante – também chamado de difuso (BRUEL & KJAER, 2005),

respectivamente. É no campo sonoro difuso que encontram-se os fenômenos acústicos como a reverberação, entre outros. A figura 3 ilustra o fenômeno do campo livre e do campo reverberante. Esse princípio teórico norteia a criação de diversos sistemas de adequação acústica de edificações.

**Figura 3:** Campo livre e campo reverberante.



Fonte: Adaptado de Valle (2006) e Bruel e Kjaer (1978).

Além disso, se o mesmo ouvinte (receptor) estiver posicionado fora da mesma sala em que a mesma fonte sonora foi acionada, seu sistema auditivo vai captar a interação entre o campo livre e o campo difuso que evade das aberturas dela. Se nessa sala não houver materiais absorvedores instalados nas superfícies internas condicionando acusticamente o recinto, e conseqüentemente permitindo o aumento do campo difuso, a impressão que o ouvinte tem (ainda posicionado fora dessa sala) é a de que o som produzido ali é mais intenso que o som originalmente emitido.

Entretanto, se os materiais das superfícies internas desse ambiente forem absorvedores, a percepção do som refletido é menor, ficando mais evidente o som proveniente do emissor (adaptado de GERGES, 1992). Fahy (2000) explica que para conter os campos direto e difuso gerados por uma fonte sonora, a transmissão sonora e vibracional de um sistema pode ser controlada pela seleção apropriada das mais diferentes impedâncias de componentes presentes no caminho pelo qual o som se propaga, devendo esses materiais estarem completamente vedados. Impedância sonora é a resistência no meio em que o som se propaga (LONG, 2006).

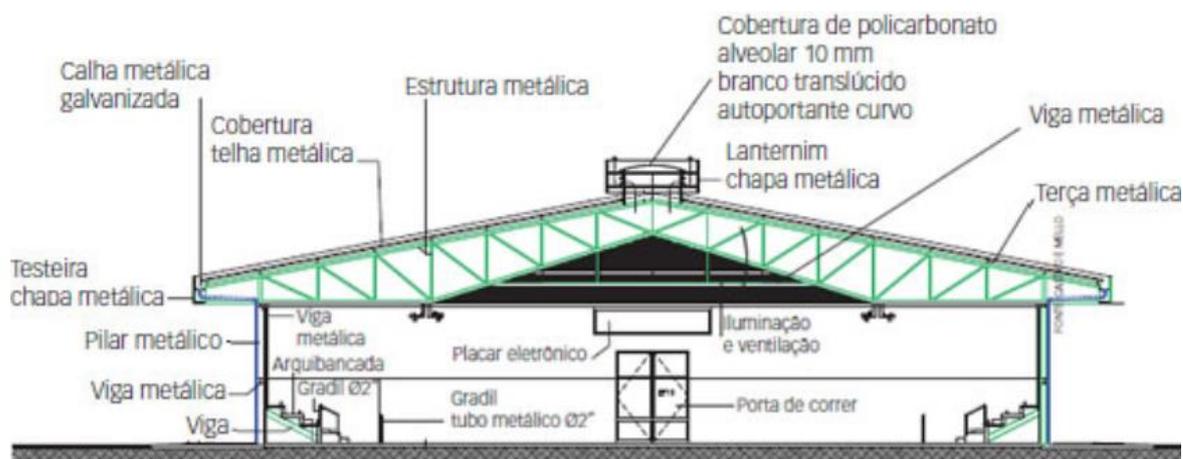
Assim, para isolar completamente o som dos campos livre e reverberante, é importante destacar que o isolamento acústico completo de um ambiente não permite que haja qualquer tipo de abertura no sistema projetado.

## 2.1. Características arquitetônicas e acústicas gerais de ginásios poliesportivos

Dentre as diversas tipologias de ginásios possíveis, alguns esportes demandam um programa de necessidades padrão (figura 4) para o pleno atendimento de exigências voltadas a cada um deles, entretanto, no Brasil, é comum a presença de ginásios poliesportivos, que atendem a um maior número de práticas esportivas. Dessa forma, as características arquitetônicas desses locais ainda permitem variedade de configurações de cobertura: ginásios com abertura zenital parcial, ginásios totalmente cobertos, ginásios totalmente abertos, entre outros, devendo-se respeitar algumas recomendações:

“A altura mínima é de 7,50m - jogos de tênis necessitam de 12m de altura no centro da quadra. A cobertura deve garantir livremente esse pé-direito, e atender a requisitos de estanqueidade de água e som. Deve-se pensar também em trilhos, barras e estruturas na cobertura, com pontos de fixação para eventuais cabos de aço, iluminação extra em eventos não esportivos etc”. (SAYEGH, 2011)

**Figura 4:** Componentes construtivos encontrados em ginásios poliesportivos.



Fonte: SAYEGH (2011).

No que se refere à iluminação, Neufert (1998) indica que as áreas de todas as aberturas dos ginásios devem possuir 1/6 (um sexto) da área da superfície total de suas paredes. Assim, a passagem de iluminação natural, sem encandeamento (iluminação difusa), deve garantir iluminação média de 120 lux para exercícios e 200 lux para competições. Lux é a unidade de medida para iluminação. A Tabela 1, a seguir, especifica os tipos de pisos.

**Tabela 1:** Características de pisos de ginásios em função de sua tipologia.

Ambiente	Material da base do piso	Material de revestimento
<b>Quadras externas</b>	Concreto, asfalto e agregados.	Acrílico, poliuretano, pré-fabricados em placas e mantas, saibro e areia, grama sintética.
<b>Quadras cobertas</b>	Concreto, asfalto e agregados.	Poliuretano autonivelante com ou sem camada amortecedora de impactos, pré-fabricados, assoalhos flutuantes em madeira, base asfáltica com revestimento acrílico, saibro (para tênis), e grama sintética.
<b>Ginásios</b>	Concreto, prevendo impermeabilização, acabamento da superfície, juntas de dilatação, planicidade e sobrecargas.	Poliuretano autonivelante com ou sem camada amortecedora de impactos, pré-fabricados, e assoalhos flutuantes em madeira.
<b>Campos esportivos</b>	Granulado e borracha.	Grama sintética ou natural (quando natural, a base do piso não é necessária).

Fonte: Adaptado de SAYEGH (2011).

A tabela 2 apresenta dados descritos por Neufert (1998), que classifica ginásios poliesportivos em função de suas dimensões.

**Tabela 2:** Classificação de ginásios poliesportivos escolares e não-escolares.

Tipo de ginásio	Medidas interiores (m)	Superfície útil: quadra + público (m <sup>2</sup> )	Jogos possíveis
Ginásios pequenos em escolas ≤ 7 aulas	10 x 18 x 5,5	180	Badminton, voleibol, etc
Ginásios de médio porte em escolas ≥ 12 aulas	12 x 24 x 5,55	288	Badminton, futsal, voleibol, basquete, etc.
	14 x 28 x 5,55	392	O mesmo ↑
Ginásios grandes Alunos ≤ 12 e < 15 anos	18 x 30 x 6	540	O mesmo ↑
	18 x 33 x 6	594	Além destes, tênis, etc.
Salas de jogos e esportes	≥21 x 42 x 7	882	Além destes, tênis de mesa, patins sobre rodas, etc.
Salas de recreio	9 x 9 x 4	81	Tênis de mesa
	9 x 12 x 4	108	
	15 x 15 x 4	225	Esportes gerais com limitações de espaço.
	15 x 17 x 4	270	

Fonte: Adaptado de NEUFERT (1998).

O programa de necessidades de um ginásio poliesportivo não consiste apenas em uma quadra e arquibancadas ao seu redor. Um adequado projeto desse tipo de ambiente possui, segundo Sayegh (2011), no mínimo: sala de administração, depósito de material esportivo, vestiários e banheiros, de forma que as áreas secas sejam separadas das áreas molhadas. Além disso, o múltiplo uso de ginásios poliesportivos a atividades não restritivas ao esporte é cada vez mais comum: shows, feiras e outros

eventos que reúnem público onde, muitas vezes, são empregados sistemas eletroacústicos no recinto para reforço sonoro, amplificando ainda mais o ruído dentro desses locais (RODRIGUES, 2008).

Dessa forma, quando um local ou um bairro possui características sonoras únicas que os destacam em uma comunidade, é classificado como marco sonoro (Schaffer 1977 apud Oliveira, 2017), portanto, ginásios poliesportivos, quando produtores de altos níveis de ruído, podem ser considerados como marcos sonoros urbanos, uma vez que são percebidos com incômodo pela vizinhança, sendo necessário que esses ambientes atendam normas técnicas para controle de ruído.

Normas técnicas são diretrizes criadas por comitês de profissionais especialistas em áreas de conhecimento específicas. Elas definem parâmetros, métodos de aferição e quantifica valores de referência para certificação de produtos, sistemas e rotulagem ambiental. Há 71 normas brasileiras relacionadas a acústica aplicáveis a diversas áreas (site ABNT, 2018).

No que tange às normas brasileiras voltadas ao conforto acústico para a construção civil, os anos de publicação das primeiras edições da NBR 10.151 (ABNT, 2000) e 10.152 (ABNT, 2017) são próximos ao ano de publicação das Resoluções 01/1990 e 02/1990 do Conselho Nacional do Meio Ambiente, o CONAMA, que definem as diretrizes para a criação de novas normas de controle de poluição sonora e apresentam métodos de controle do ruído prejudicial à saúde (CONAMA, 1990).

## **2.2. Normas brasileiras de acústica aplicáveis a ginásios poliesportivos e o contexto urbano da cidade de Maceió-AL**

A Acústica Moderna tem pouco mais de 100 anos de desenvolvimento no mundo. Entretanto, no Brasil, decisões e medidas efetivas do poder público para o tema levaram praticamente um século para serem realizadas com a finalidade de controlar a exposição da população ao ruído excessivo, que causa danos à saúde. A presença das normas técnicas e diretrizes em resoluções e legislações mostram a disposição do país em correr atrás do tempo perdido. A seguir, algumas normas brasileiras relacionadas a ginásios poliesportivos serão comparadas com normas

internacionais diretamente aplicadas também a esses ambientes para melhor compreensão.

### 2.2.1. NBR 10.151:2000

A NBR 10.151:2000 fixa as condições de aceitação de ruído em comunidades e especifica um método de medição e avaliação de ruído interno e externo das edificações orientando o posicionamento dos medidores de pressão sonora e dando abertura à aferição em função das experiências dos reclamantes (ABNT, 2000). A aplicação do método de medições utilizado neste trabalho será apresentado no capítulo 3 e no apêndice 2.

Um dos parâmetros apresentados na NBR 10.151:2000 é o NCA – Nível de Critério de Avaliação, que define os limites de nível de ruído equivalente ponderado em A ( $L_{Aeq}$ ) adequados para as áreas externas em que ambientes estão inseridos, ou seja, avaliam o ruído no entorno de edificações, por isso que essa norma é aplicável no contexto de ginásios poliesportivos. Os valores são fixados para períodos noturnos e diurnos. Tais informações são a base para a confecção de mapeamento sonoro urbano.

**Figura 5:** NCA – em dB(A) – para ambientes externos.

<b>Tipos de áreas</b>	<b>Diurno</b>	<b>Noturno</b>
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: Adaptado de ABNT (2000).

É importante ressaltar que a NBR 10.151:2000 passa por uma revisão e está em estágio de consulta pública visando sua atualização. De qualquer forma, algumas diretrizes definidas nessa norma são utilizadas para orientar as medições acústicas em ambientes internos e externos, são elas (ABNT, 2000):

- Os sonômetros devem ser de Classe 2 ou 1 (classe relativa ao nível de precisão do equipamento), devem medir LAeq e possuir certificado de calibração renovado a cada 2 anos;
- O tempo de medição que consta na norma é de 5 segundos no modo de leitura rápida (*fast*) de sonômetros mais simples, que não geram o LAeq automaticamente;
- O ruído “de fundo” (termo entrou em desuso), chamado de Lra – Nível de Ruído Ambiente, deve ser medido em período em que o som analisado não esteja operando, mas o tempo de medição não é definido;
- Quando o nível de ruído ambiente (Lra) for maior que o determinado pelos níveis de critério de avaliação, o valor obtido na medição deve ser registrado e tomado como referência para a medição específica;
- As medições não podem ocorrer em períodos com interferência sonora de intempéries (trovões, chuvas fortes, etc.). Na ocorrência de ventos fortes, usar espuma protetora na ponta do microfone do sonômetro;
- No caso de haver reclamação de ruído de algum local apontado por um reclamante, o sonômetro deve ser posicionado no exterior da edificação que contém a fonte de sonora acusada, distando, no mínimo, 2 metros de quaisquer superfícies refletoras e, 1,2 metro do piso. A medição no exterior da residência do reclamante também deve ser feita respeitando essas mesmas dimensões mínimas;
- Quando for possível realizar a medição no interior de um ambiente (reclamante), o posicionamento do sonômetro deve respeitar as seguintes distâncias: 1 metro de quaisquer superfícies e 0,5m entre os pontos em que o sonômetro foi posicionado. Os cômodos de posicionamento do sonômetro devem ser sugeridos pelo reclamante;
- Os níveis de pressão sonora, quando medidos em mais de três pontos no interior das edificações, devem ser a média aritmética dos valores encontrados.

Em comparação à realidade inglesa, a NBR 10.151 não adota os mesmos parâmetros e referências de emissores de ruído, uma vez que o ruído externo à edificação é o objeto de análise da norma inglesa, enquanto o ruído interno é a

referência para a norma brasileira. Os valores de NCA ( $L_{Aeq}$  global para medições externas) não especificam o uso voltado aos ginásios poliesportivos brasileiros, permitindo ampla interpretação dos dados em função do local em que este ginásio esteja implantado.

### 2.2.2. NBR 10.152:2017

A NBR 10.152 (2017) fixa os níveis de ruído de acordo com o conforto acústico interno de diversas tipologias de ambientes e também orienta os procedimentos de medições nessa circunstância. Na figura 6, a seguir, há um destaque aos valores de ruído residual recomendados para ginásios esportivos brasileiros. Os parâmetros utilizados são:  $L_{Aeq}$ ,  $L_{ASmax}$  e curvas NC (sem filtro ponderação A por frequência).

**Figura 6:** Valores dB(A) e NC apresentados na NBR 10.152.

Finalidade de uso	Limites sonoros recomendados		
	$RL_{Aeq}$ em dB(A)	$RL_{ASmax}$ em dB(A)	$RL_{NC}$ em dB
Bibliotecas	40	45	35
Museus (Exposições)	40	45	35
Estúdios de gravação audiovisual	25	30	20
<b>Educacionais</b>			
Auditórios pequenos (< 600 m <sup>3</sup> )	35	40	30
Auditórios grandes (> 600 m <sup>3</sup> )	30	35	25
Circulações	50	55	45
Creches	40	45	35
Salas de aula	35	40	30
Salas de música	35	40	30
<b>Escritórios</b>			
Centrais de telefonia ( <i>Call centers</i> )	50	55	45
Circulações	50	55	45
Escritórios privativos (Gerência, Diretoria, etc.)	40	45	35
Escritórios coletivos ( <i>Open plans</i> )	45	50	40
Recepções	45	50	40
Salas de espera	45	50	40
Salas de reunião	35	40	30
Salas de vídeo conferência	40	45	35
<b>Esportes</b>			
Ginásios de esportes	45	50	40
Academias de ginástica	45	50	40
<b>Hotéis</b>			
Quartos individuais ou suítes	40	45	35

Fonte: ABNT (2017) com destaque feito pelo Autor.

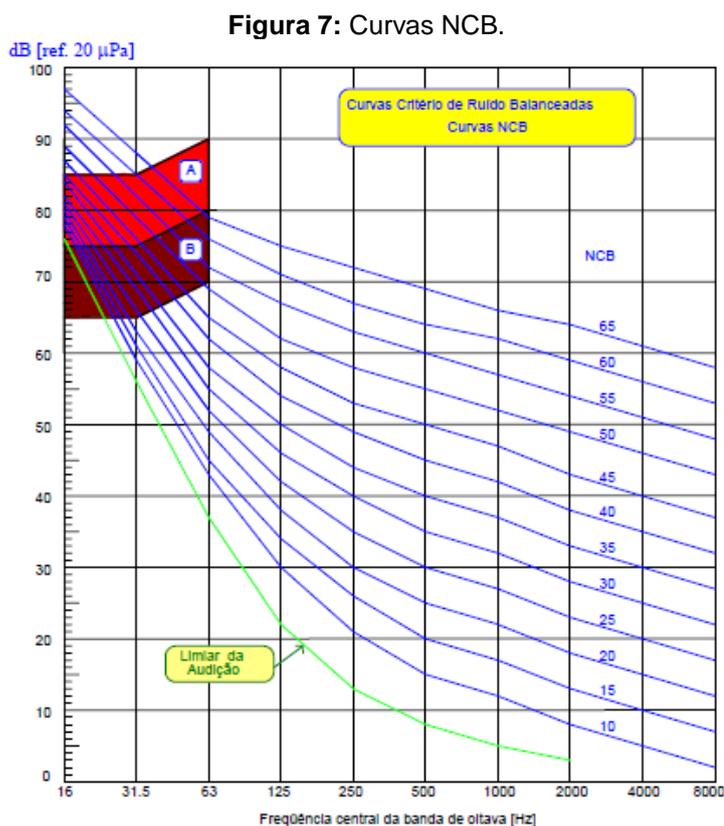
Para todos os valores de todos os três parâmetros desta norma, há uma tolerância de 5dB para cada um deles.  $L_{Aeq}$  é o mesmo parâmetro avaliado na NBR 10.151, mas o contexto da NBR 10.152 é o ruído interno das edificações, focado no

conforto sonoro do usuário inserido no local. LASmax é o máximo nível de pressão sonora no filtro de ponderação A em um determinado tempo “S” (ABNT, 2017).

As curvas NC (do inglês *noise criteria* – critério de ruído) representam os níveis de pressão sonora (NPS) por frequência, comumente indicados para diversos tipos de atividades dentro de edificações. Os valores de NC não sofrem alteração dos filtros de ponderação pelo fato deles tratarem de energia acústica dentro de um recinto.

Elas foram desenvolvidas por Leo Beranek em 1957 para avaliar as condições de inteligibilidade (compreensão) da fala em qualquer ambiente interno e baseadas nas características auditivas do ser humano (LONG, 2006). Em 1989, O Autor publicou um aprofundamento do estudo criando a NCB (*Balanced Noise Criteria Curves*), ampliando sua aplicação à análise além da inteligibilidade nos locais.

Cada uma das curvas define o limite de ruído residual e normas direcionam as curvas para atividades específicas, permitindo avaliar a percepção de NPS de qualquer ambiente considerando as frequências organizadas em bandas de 1/1 oitava (de 125 Hz a 8kHz) mediante uso de um único valor de referência (FERNANDES, 2002).



Fonte: FERNANDES (2002).

A atualização da NBR 10.152 trouxe informações complementares e inserção de novos termos técnicos que possivelmente serão adotados na atualização da NBR 10.151, bem como define diretrizes para os procedimentos de medições acústicas no interior dos recintos analisados (ABNT,2017):

- O termo “ruído de fundo” foi extinto, sendo substituído pelo termo “ruído residual”, a que também se refere o Lra (nível de ruído ambiente) presente na NBR 10.151;
- As configurações do sonômetro e as recomendações de condições ambientais são as mesmas da NBR 10.151, com a recomendação de que sonômetros de Classe 2 operem em temperaturas entre 0°C e 40°C. A respeito do uso de protetor de vento na ponta do microfone do sonômetro, há uma recomendação adicional que orienta a correção de influência desse dispositivo na resposta de frequência do microfone;
- No mínimo, 3 pontos de medição devem ser levantados. Quando o volume do recinto analisado for superior a 100m<sup>3</sup>, deve-se aumentar um ponto de medição a cada 50m<sup>3</sup> adicionais de volume do ambiente;
- Os pontos de medição no interior dos ambientes devem ser distanciados, no mínimo, a 0,7m entre si, as distâncias do sonômetro para paredes e superfícies refletoras devem ter distância mínima de 0,5m e a distância do medidor de pressão sonora para janelas, portas ou entradas de ar que permitam a transmissão sonora com maior facilidade, deve ser 1 metro, no mínimo;
- O tempo de levantamento deve ser suficiente para registrar as variações sonoras significativas ao ambiente interno. Cada um dos pontos deve ser avaliado por, pelo menos, 30 segundos.

A NBR 10.152 menciona que seu objetivo é promover a saúde e o bem-estar humano (ABNT, 2017), protegendo-o do ruído excessivo. Os danos à saúde ocasionados por excesso de exposição sonora são tratados em outras normas mais específicas e legislações, como a Portaria 3.214 de 8 de junho de 1978 do Ministério do Trabalho, que aprovou a Norma Regulamentadora nº 15 (BRASIL, 1978), que alerta sobre as consequências à saúde a quem trabalha exposto a grandes níveis de ruído em ambientes fechados e sem tratamento acústico adequado.

É importante resgatar o dado que indica a poluição sonora como a segunda maior responsável por danos à saúde do homem (SENADO, 2012). No Brasil, este problema já recebe atenção do poder público e legislações foram desenvolvidas para o devido combate, como a NR15 e a NR17, que regulam sobre as condições adequadas de trabalho para evitar insalubridade (BRASIL, 1978), bem como os horários máximos permissíveis para a exposição ao ruído (BRASIL, 1992).

Assim, dependendo da intensidade e do tempo de exposição ao ruído, os prejuízos à saúde vão da simples falta de concentração, problemas nas cordas vocais e desorientação, até estresse degenerativo, infarto, anestesia por endorfina e perda da audição induzida por ruído (BRASIL, 1978). Diante do exposto, baseado na Lei Federal de contravenções penais, (Lei nº 3.688, de 3 de outubro de 1941) leis foram criadas em diversos municípios para salvaguardar o bem-estar público (JUSBRASIL, 2015).

A expressão “Lei do Silêncio” ganhou ampla difusão e diversos programas de fiscalização em vários estados foram criados. Em São Paulo, o Programa de Silêncio Urbano (PSIU) atua na fiscalização de ruído fazendo a vistoria de diversos tipos de estabelecimentos públicos mediante denúncias. Reflexo disso é uma série de diretrizes definidas nos planos diretores de diversas cidades, exigindo diversas documentações para a concessão de alvará de funcionamento de diversos estabelecimentos (JUSBRASIL, 2015).

### **2.2.3. O EIV, os estudos de impacto sonoro em Maceió e NBR 15.575:2013.**

O Estudo de Impacto de Vizinhança é um instrumento jurídico, nascido com o Estatuto da Cidade – Lei 10.257 (BRASIL, 2001) – capaz de normatizar os usos do solo partindo-se do princípio de que a propriedade privada não confere, *per si*, o arbítrio indiscriminado de seus detentores, pelo próprio compartilhamento imposto pelo espaço urbano.

Uma vez que qualquer edificação ou obra envolva mudanças paisagísticas ou de fluxo a ponto de interferir na área de implantação de algum modo, o EIV é aplicado obrigatoriamente para salvaguardar o bem comum, o entorno. (adaptado de PAULINO, 2011).

Ademais, indica as variáveis mínimas a serem obrigatoriamente contempladas na elaboração do EIV, quais sejam: adensamento populacional, equipamentos urbanos e comunitários, uso e ocupação do solo, valorização imobiliária, geração de tráfego e demanda por transporte público, ventilação e iluminação, paisagem urbana e patrimônio natural e cultural (PAULINO, 2011).

No texto de Paulino (2011), não é mencionado o conforto acústico. É comum encontrar EIVs que contemplem pouco ou nenhum aprofundamento às questões de ruído ambiental. No panorama da cidade de Maceió, o Plano Diretor (Maceió, 2005) apresenta, em seu artigo 134, um roteiro mínimo de análise projetual às seguintes abordagens:

- I – adensamento populacional;
- II – equipamentos urbanos e comunitários;
- III – uso e ocupação do solo;
- IV – valorização imobiliária;
- V – geração de tráfego e demanda por transporte público;
- VI – ventilação e iluminação;
- VII – paisagem urbana e patrimônio natural e cultural;
- VIII – poluição ambiental;
- IX – risco a saúde e a vida da população. (Maceió, 2005).

O Plano Diretor de Maceió não deixa claro que os estudos de impacto sonoro sejam obrigatórios e aprofundados em projetos ou em EIVs, a não ser que haja o entendimento de que poluição sonora está inclusa no item “VIII - poluição ambiental, deixando a cargo do empreendedor a iniciativa em contratar um serviço técnico mais aprofundado nesta área. Duarte e Viveiros (2004) mostram que, ao longo dos anos, as construções do Brasil perderam eficiência no isolamento sonoro entre partições por conta do foco no barateamento na execução de obras.

Em função desse problema em acústica e diversas outros problemas em outras áreas de conforto ambiental e estruturas das edificações motivadas pelo foco em economia sem fundamento, a NBR 15.575 entrou em vigor para classificar e enquadrar edificações em níveis mínimos de adequação de conforto ambiental, abrangendo critérios às seguintes áreas: sistemas estruturais, sistemas de pisos, coberturas e sistemas hidrossanitários, bem como conforto térmico, lumínico e acústico, sendo dividida em 5 seções (ABNT, 2013).

Essa norma ganhou força e representatividade na construção civil brasileira e já se encontra novamente em revisão. Paixão (2002) mostra que desde o início dos anos 2000, o COBRACON (Comitê Brasileiro da Construção) coordenou o desenvolvimento de parâmetros mínimos de desempenho nas edificações, incluindo a acústica.

### **2.3. Parâmetros arquitetônicos de ginásios poliesportivos escolares brasileiros**

Ginásios poliesportivos presentes em ambientes residenciais urbanos são comumente percebidos em complexos educacionais, independentemente de serem particulares ou públicos. A infraestrutura escolar exigida pelo FNDE (Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação) considera as quadras poliesportivas como item que compõe infraestrutura básica para uma instituição educacional (MEC, 2018).

Basicamente, duas tipologias de construção completa de quadras poliesportivas são consideradas: modelo com palco e modelo com vestiário, ambas idênticas em seus componentes construtivos, mas com ligeira diferença no programa de necessidades de cada. O memorial descritivo, em suas atribuições gerais, explana as características construtivas dessa edificação, ilustrada na figura 8, a seguir:

O Projeto Quadra Coberta com Vestiários visa atender a demanda de espaço para práticas esportivas nas escolas municipais e estaduais. O referido projeto apresenta uma área total de 980,40 m<sup>2</sup> de cobertura, para implantação em terrenos de 30x41 metros quadrados. A técnica construtiva adotada é convencional, possibilitando a construção da quadra escolar em qualquer região do Brasil, adotando materiais facilmente encontrados no comércio e não necessitando de mão-de-obra especializada.

As vedações são em alvenaria de tijolo furado revestido e a estrutura de fundações e pilares em concreto armado e arco metálico treliçado. A cobertura será em telha metálica curvada. Para o revestimento do piso, especificou-se cerâmica resistente à abrasão nos vestiários e concreto polido na quadra. O revestimento interno de áreas molhadas com cerâmica facilita a limpeza e visa reduzir os problemas de execução e manutenção. As portas são especificadas em madeira pintada. As esquadrias são do tipo basculante, em alumínio, opção que possibilita regular a ventilação natural. (FNDE, 2018).

**Figura 8:** Projeto e construção de quadra poliesportiva – modelo FNDE.



Fonte: FNDE (2018).

As definições construtivas presentes no texto do FNDE explicitam a pouca exigência de planejamento caso a caso em sua construção, solicitando, apenas, que a edificação atenda a requisitos básicos de conforto térmico através de esquadrias basculantes. Já o conforto acústico ainda é tido como um item em obra que exige alto nível de especialização em sua execução, restando apenas que a mitigação de ruído se dê, unicamente, através do afastamento da implantação da edificação em relação ao entorno. Assim, o ginásio poliesportivo é protegido do ruído externo e seu ruído não passa a ser percebido com incômodo pela comunidade. Bistafa (2011) trata esta estratégia como a mais arcaica para o controle de ruído. É importante destacar que o memorial descritivo do FNDE (2018) não prevê a possibilidade desta edificação ser, também, uma fonte de ruído:

- **Localização do terreno:** privilegiar localização próxima a demanda existente, com vias de acesso fácil, evitando localização próxima a zonas industriais, vias de grande tráfego ou zonas de ruído; Garantir a relação harmoniosa da construção com o entorno, visando o conforto ambiental dos seus usuários (conforto higrotérmico, visual, acústico, olfativo/qualidade do ar);

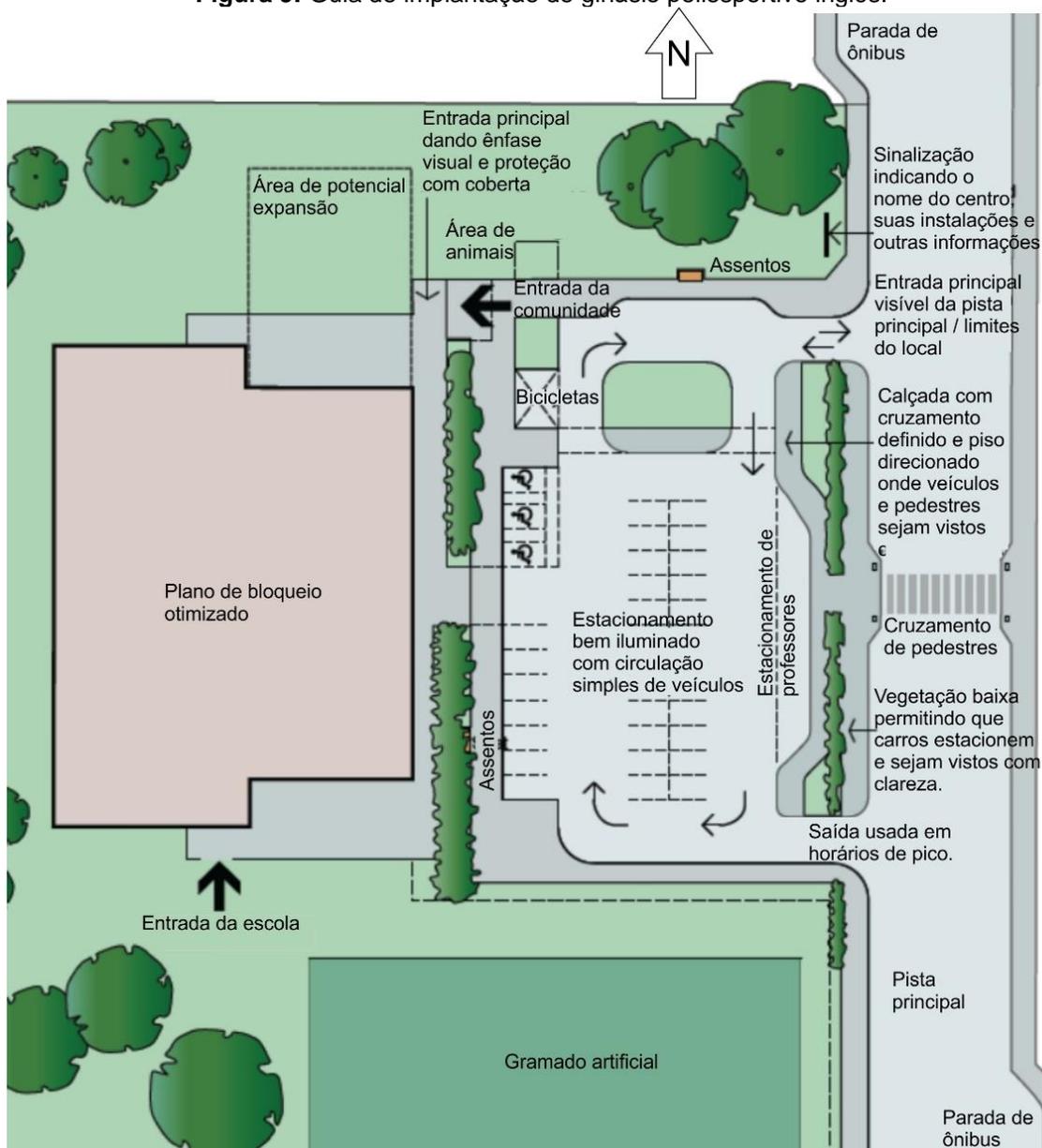
- **Adequação da edificação aos parâmetros ambientais:** adequação térmica, à insolação, permitindo ventilação e iluminação natural adequadas nos ambientes;

- **Adequação ao clima regional:** considerar as diversas características climáticas em função da cobertura vegetal do terreno, das superfícies de água, dos ventos, do sol e de vários outros elementos que compõem a paisagem, a fim de antecipar futuros problemas relativos ao conforto dos usuários. (FNDE, 2018).

## 2.4. Parâmetros arquitetônicos e acústicos de guias e normas internacionais

Nos países europeus, a Inglaterra é referência em políticas de apoio à infraestrutura de ginásios poliesportivos. Nesse país, 55% de todos os seus ginásios pertencem a grupos educacionais, 16% são de autoridades locais e o restante é de uso particular eminentemente comercial (SPORTS ENGLAND, 2012). No que se refere a ginásios escolares, as dimensões mínimas aceitáveis são 34,5m x 20m x 7,5m, enquadrados como grandes espaços fechados para prática de esportes segundo Neufert (1998).

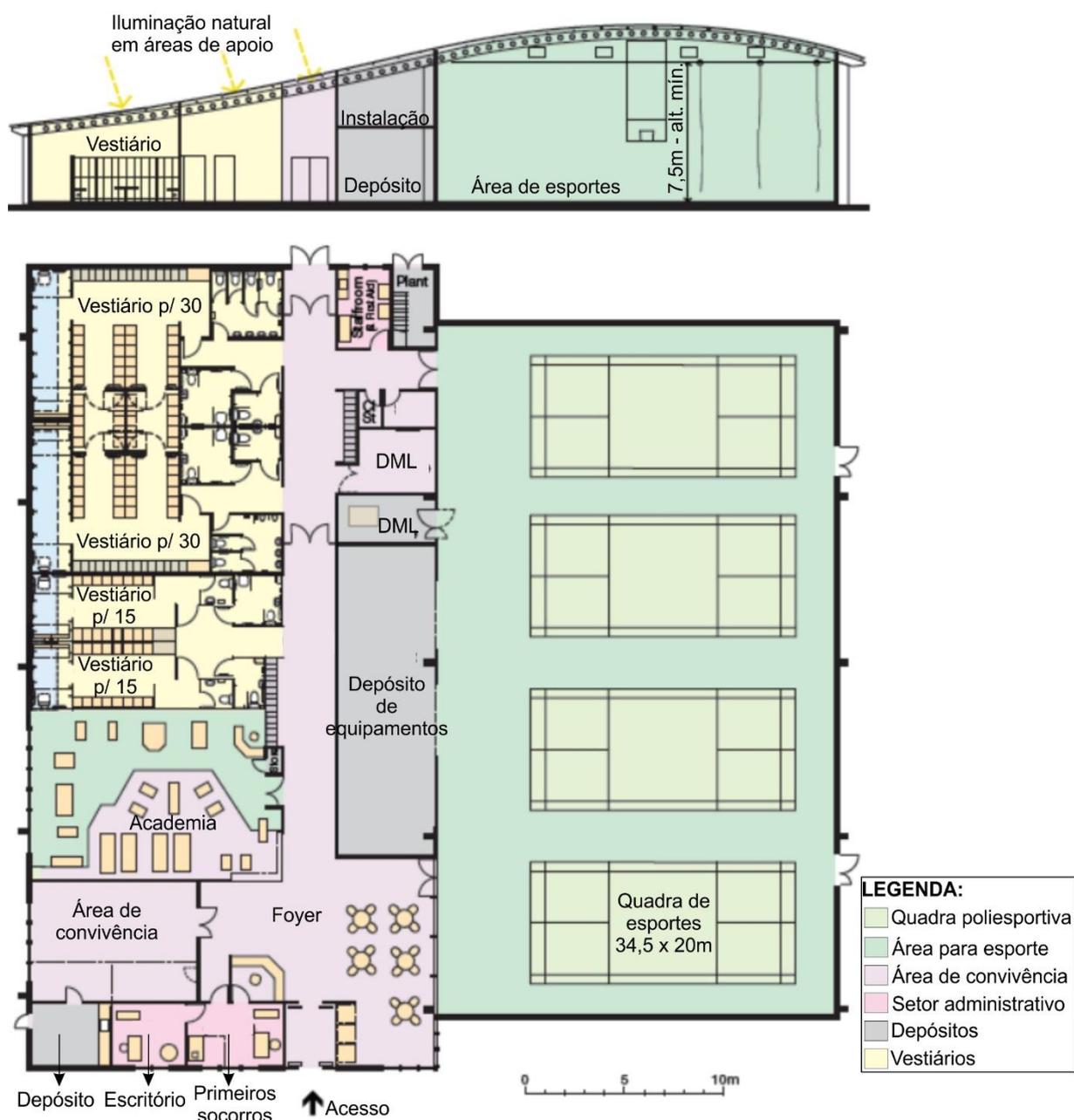
**Figura 9:** Guia de implantação de ginásio poliesportivo inglês.



Fonte: Adaptado de SPORTS ENGLAND (2012).

No contexto da Inglaterra, os projetos são orientados em guias construtivos, que determinam a implantação, os acessos, as sinalizações (figura 9), programa básico de necessidades (figura 10), determinando também alta qualidade nos materiais utilizados em obra.

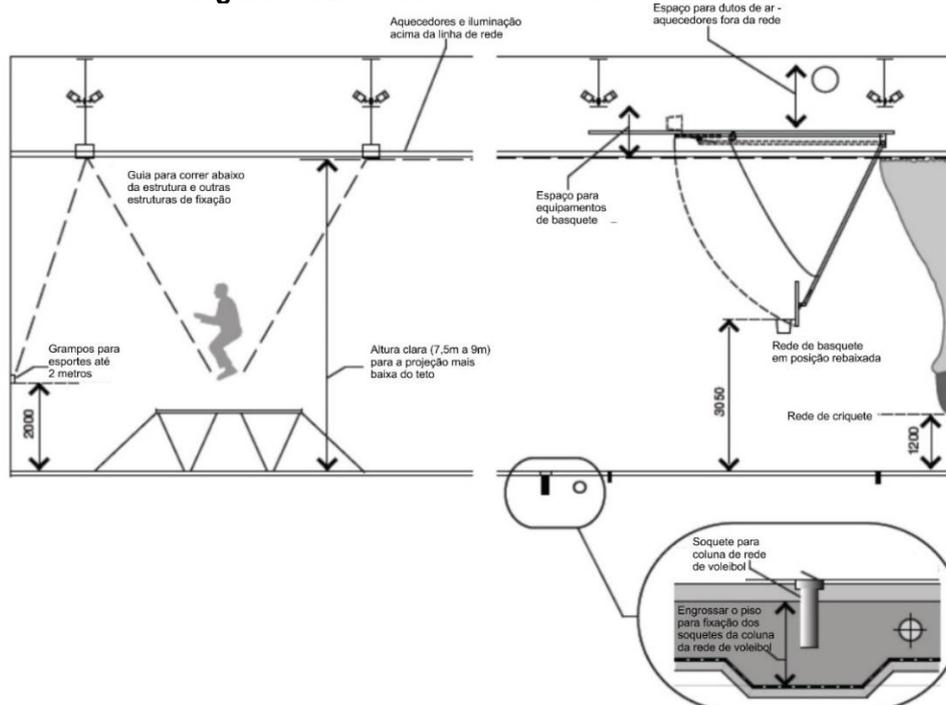
**Figura 10:** Iluminação natural e programa de necessidades.



Fonte: Adaptado de SPORTS ENGLAND (2012).

Dessa forma, todo tipo de detalhamento construtivo é apresentado e sugerido, evitando arbitrariedades técnicas por parte de projetistas, construtores e investidores nesse segmento (figura 11, a seguir).

**Figura 11:** Detalhamentos construtivos diversos.



Fonte: Adaptado de SPORTS ENGLAND (2012).

Evidentemente, o guia inglês também contempla eficiência energética, determinando níveis mínimos de 500 lux a 750 lux para o sistema de iluminação artificial, muito acima dos 120 a 200 lux que Neufert (1998) sugere. O mesmo autor sugere também esquemas que promovam ventilação cruzada e controle de temperatura específicos em função das características climáticas de cada país em que o ginásio poliesportivo for construído.

No que se refere à qualidade acústica desses espaços na Inglaterra, o tempo de reverberação (TR) deve variar entre 1,5 e 2 segundos em médias frequências para evitar uma pobre inteligibilidade (compreensão) da fala, o excessivo ruído residual, o aumento do stress dos usuários e dificuldades no controle de ruído do recinto. Os níveis de ruído de referência ingleses estão relacionados ao ambiente externo, caracterizados pelas curvas NR (*Noise Rating curve*). Já no Brasil, usa-se as curvas NC.

Fahy (2000) esclarece que as curvas NR são utilizadas para indicar valores de referência de ambientes externos e as curvas NC, juntamente com as curvas RC (*room criterion* – voltadas, mais especificamente, para ruídos de sistemas de climatização) são utilizadas para indicar valores de referência para ambientes internos.

Os valores que compõem as curvas NR e NC diferem minimamente para cada frequência, com as curvas NC sendo levemente mais tolerantes às frequências médias e altas e NR sendo levemente mais tolerantes às frequências baixas (comparação na Tabela 3, a seguir). Entretanto, o resultado prático é de grande diferença em função do ponto de referência do ruído. A curva NR limite a ser obedecida em ginásios poliesportivos ingleses é a NR40 (SPORTS ENGLAND, 2012) e nos ginásios brasileiros as curvas NC 40 determinam o limite (ABNT, 2017).

**Tabela 3:** Comparação de valores das curvas NR 40 e NC 40.

NPS Máximo (dB)										
Frequência	16Hz	31,5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz
<b>Valor NR40 *</b> Ruído externo (dB)	--	--	67	57	49	44	40	37	35	33
<b>Valor NC40 **</b> Ruído interno (dB)	84	74	64	56	50	44	41	39	38	37

**Fontes:** \* (SPORTS ENGLAND, 2012)  
\*\* NBR 10.152 ( ABNT, 2017)

Fonte: Adaptado de ABNT (2017) e site Engineering Toolbox (2018).

Mesmo que a NBR 10.152 seja baseada em dados internacionais (ABNT, 2017), os limites para ginásios poliesportivos mostram uma tolerância a ruído maior que as normas inglesas. Note-se que as curvas NR são relacionadas ao ruído desejado no entorno da edificação e as curvas NC são relacionadas ao ruído dentro da edificação, ou seja, o ruído dentro de ginásios poliesportivos ingleses é ainda menor que o mínimo esperado para essas edificações no Brasil.

Mesmo com o nível de exigência dado aos ginásios poliesportivos ingleses, a pesquisa de Conetta *et al.* (2003), que levantou as características acústicas de 5 quadras poliesportivas e 4 ginásios grandes, revelou que das 9 edificações avaliadas, apenas 3 possuíam algum tratamento acústico abaixo da coberta e apenas uma quadra poliesportiva fechada possuía tratamento acústico, mesmo assim em parte de suas paredes.

Rodrigues (2008) afirma que são poucos ginásios no mundo que possuem projeto acústico especializado e a intervenção pós-obra torna ainda mais oneroso o

custo para viabilizar uma solução eficaz para um ginásio poliesportivo que incomoda a vizinhança.

## **2.5. Estratégias de controle de ruído em ginásios poliesportivos de clima quente e úmido**

As diretrizes definidas em normas brasileiras e internacionais levam em consideração condicionantes ambientais, culturais e técnicos dentro do contexto de seus países. De toda forma, é importante frisar que os níveis das normas acústicas brasileiras ainda possuem forte influência dos valores definidos nas normas internacionais. É visto em ambos os contextos, que os ginásios não são considerados fontes de ruído capazes de influenciar na paisagem sonora de uma vizinhança.

As soluções de acústica para ginásios ruidosos que incomodem a vizinhança, inseridos em um contexto urbano residencial e climático quente e úmido, como ginásios escolares em Maceió, não podem negligenciar a necessidade de ventilação cruzada respeitando as aberturas que garantem o arrefecimento da edificação, uma vez que o isolamento acústico promoverá enorme prejuízo a essa necessidade.

Daí, a única proposta de controle de ruído plausível para estes ambientes específicos é a redução de ruído por absorção, onde são estabelecidos dilemas: diminuir as reflexões internas ampliando superfícies absorvedoras, ou eliminando faces internas da edificação? Ao eliminar as faces internas, como proteger atletas e público da insolação direta? Em projetos públicos, como os do FNDE (2018), não é possível haver modificações. Ainda mais, o problema do ruído na vizinhança só é constatado no funcionamento da edificação já construída. Dessa forma, a redução de ruído por absorção é a estratégia a ser aplicada em uma situação restritiva de projeto.

### **2.5.1. Redução de ruído por absorção**

O embasamento teórico sobre redução de ruído por absorção permite plena compreensão após o entrelaçamento entre as diversas relações teóricas introduzidas no apêndice 1 desta dissertação. Uma vez que uma fonte sonora opera em um recinto,

gerando reclamação e não há possibilidade de reduzir o ruído, ou até selar a fonte sonora, as opções para controle do som tornam-se limitadas.

Entretanto, uma vez que o incômodo seja causado pelas reflexões sonoras em paredes geralmente não-porosas (não absorvedoras) e com baixo coeficiente de absorção acústica, a reverberação passa a ser uma das causas desse incômodo por gerar uma significativa elevação do campo reverberante, amplificando o NPS (nível de pressão sonora) originalmente produzido pela fonte ruidosa. É importante frisar que o som direto não é afetado nessa relação, mas inevitavelmente há uma redução no NPS global (SIMONS; WATERS, 2004).

Michalski (2017) aponta que quando os materiais com alto coeficiente de absorção são inseridos no ambiente fechado, se distribuídos na quantidade adequada, eliminam grande parcela do som refletido pelas superfícies, reduzindo o nível de ruído no ambiente e promovendo condições de trabalho e de comunicação adequadas no próprio recinto e em partições adjacentes.

O cálculo da magnitude da redução sonora por absorção é de difícil predição por diversos parâmetros a serem alinhados: a distância da fonte ao usuário, o número de aberturas, a influência do som do entorno, a geometria do ambiente, entre outros fatores. Em geral, assume-se que se o TR60 (tempo de reverberação) for baixo, o incômodo com os níveis de pressão sonora será proporcionalmente menor (SIMONS; WATERS, 2004).

Egan (2000) revela uma análise voltada basicamente ao comparar o potencial de redução de ruído (RR) pelo cálculo do parâmetro acústico A (absorção total) da mesma sala com e sem material absorvedor inserido (equação 2).

$$RR = 10 \log \frac{A_{\text{Com material}}}{A_{\text{Sem material}}} \text{ dB} \quad (\text{Equação 2})$$

O mesmo autor alerta para a importância de não depender da redução de ruído por absorção, pois o limite prático de redução está na ordem de 6dB. Mesmo assim, Gerges (1992) aprofunda a questão e estabelece uma relação matemática entre o nível de potência sonora (NWS) de uma fonte e o nível de pressão sonora (NPS) captado a uma distância “r” de uma sala qualquer através da seguinte equação:

$$NPS - NWS = 10 \log \left( \frac{Q_\theta}{4\pi r^2} + \frac{4}{A} \right) dB \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

$Q_\theta$  = Diretividade da fonte (grandeza adimensional);

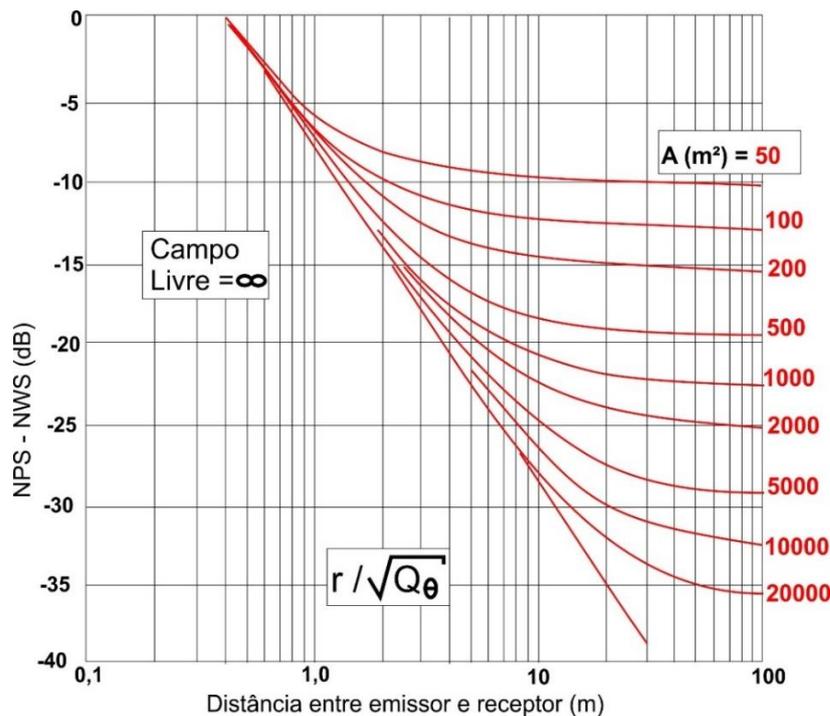
$r$  = Distância entre o centro da fonte e a posição do ponto de medição (m);

$A$  = Absorção total da sala (Sabine).

Essa relação se dá respeitando as seguintes condições (figura 12):

- Quando  $\frac{\pi r^2}{Q_\theta} \leq \frac{A}{4}$ , o efeito da absorção sonora tem pouca ação sobre a redução do nível de pressão sonora no recinto.
- Por outro lado, quando  $\frac{4\pi r^2}{Q_\theta} \geq \frac{A}{4}$ , o nível de pressão sonora é reduzido de 3dB para cada duplicação da absorção total em ambiente fechado e pequeno.

**Figura 12:** Relação entre redução de ruído e absorção no ambiente.



Fonte: Adaptado de GERGES (1992).

Essa redução é alcançada ao dobrar a área revestida ou o coeficiente de absorção sonora ( $\alpha$ ) do material empregado para o controle do ruído (GERGES,

2002). A figura 12, anterior, mostra a variação do nível de pressão sonora captado pelo ouvinte (NPS) subtraído do nível de potência sonora emitido pela fonte (NWS) com  $\frac{r}{\sqrt{Q_{\theta}}}$  em função de vários valores de A (em m<sup>2</sup>).

Ou seja, quanto maior a área de absorção, maior a probabilidade de diminuir a pressão sonora exercida pelo campo difuso, pois o som direto deixa de ser amplificado pelas reflexões internas no recinto fechado, aumentando, conseqüentemente, a probabilidade de diminuir o ruído global gerado dentro no ambiente (GERGES, 1992).

Bistafa (2011) elucida que espaços para as mais diversas atividades não são completamente reverberantes e, tampouco, completamente anecóicos (sem reflexão sonora). O mesmo autor informa que materiais absorvedores quase sempre são maus isolantes acústicos e a aplicação para a redução de ruído de um recinto diminui o NPS em poucos *decibels*.

Uma vez que o ruído desse local incomode seu entorno e não seja possível realizar o isolamento acústico devidamente, a redução de ruído por absorção passa a ser uma estratégia a ser considerada para a solução da questão. Para tanto, a associação de ferramentas computacionais e sistemas de medição acústica locais foram utilizados para investigar o comportamento sonoro neste estudo de caso. A seguir, uma breve descrição dos *softwares* utilizados neste trabalho é apresentada.

## 2.6. Descrição de *softwares* de acústica disponibilizados

Os *softwares* são utilizados para facilitar a análise e diagnóstico dos fenômenos sonoros que ocorrem no ambiente construído e assim possibilitar a análise de várias estratégias de controle acústico antes da execução de uma obra. Há também *softwares* dedicados às medições acústicas *in situ* (no local estudado) com o uso de sinais acústicos (como o ruído rosa, ruído branco, sinal de onda pura – onda senoidal) coordenando fontes sonoras e microfones especiais.

Ainda há *softwares* que são dedicados a cálculos de parâmetros acústicos, bem como *softwares* capazes de simular e prever o comportamento sonoro virtualmente, tanto para isolamento, quanto para condicionamento acústicos. Todas essas ferramentas computacionais têm a finalidade de contribuir para o esclarecimento do

comportamento sonoro, possibilitando, inclusive, sua visualização mediante mapeamento de níveis de pressão sonora e parâmetros acústicos.

As ferramentas utilizadas neste trabalho para investigar a forma como as ondas sonoras atuam no objeto de estudo foram:

- *Software* de medição *in situ*: *Room EQ Wizard* ;
- *Software* de medição *in situ*: *dBbati 32* e *dBTrait*;
- *Software* de simulação – condicionamento acústico: *EASE 4.3*;
- *Software* de simulação – mapeamento de ruído urbano: *Noise 3D*.

### **2.6.1. Softwares de medição acústica *in situ***

Quando um som é produzido em um determinado ambiente dotado de obstáculos e colide neles (ocorrendo absorção, reflexão e transmissão) diversas interferências são criadas na onda sonora original e esse comportamento é configurado como a resposta acústica de um espaço (BRANDÃO, 2016).

As medições acústicas para obtenção de dados mais aprofundados para a realização de condicionamento acústico em ambientes são realizadas com fontes sonoras omnidirecionais (que emitem som em todas as direções) e sonômetros ou microfones omnidirecionais (que captam o som em todas as direções) acoplados a placas de áudio conectadas em um computador (figura 13) com *softwares* capazes de analisar a resposta acústica do ambiente avaliado .

Fahy (1997) diz que procedimentos de medições nunca podem ser reproduzidos com precisão a nível de se estabelecer um padrão. A reprodutibilidade é afetada por variações diversas: condições do local, potência sonora, fornecimento de energia, mal contato em cabos, até montagem diferente. Farina (2000) mostra que as duas técnicas mais apropriadas para a medição acústica de uma sala consistem na:

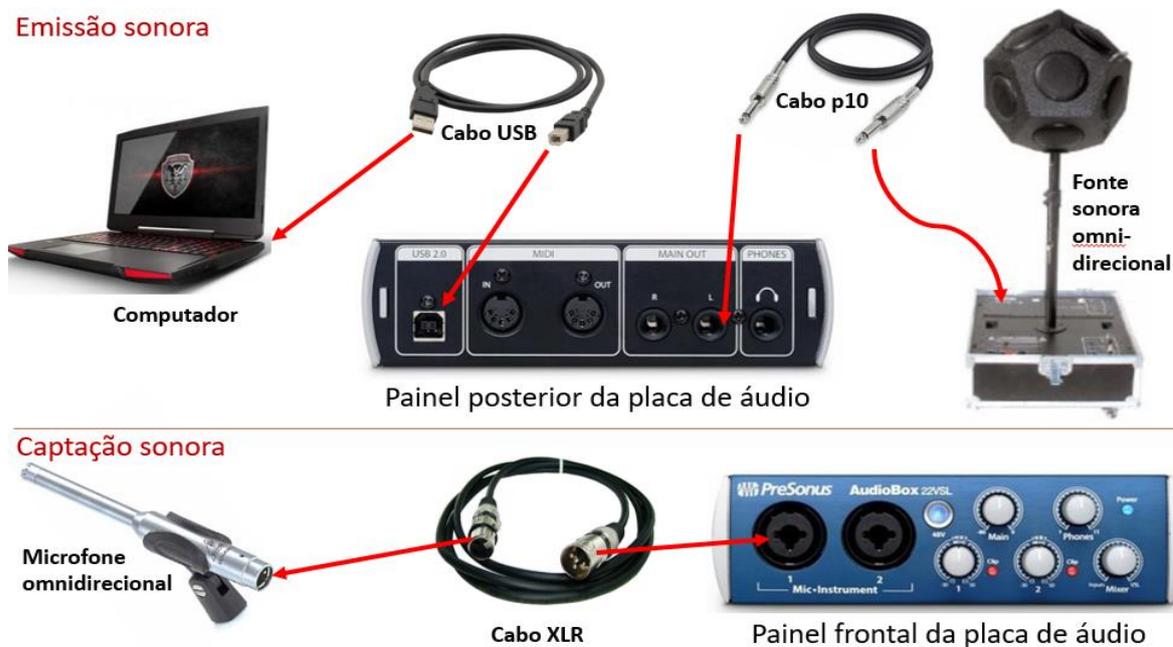
- Caracterização da função linear de um sistema, através de medições de resposta ao impulso acústico – sinal acústico: ruído branco (sinal onde sua potência é igualmente distribuída em todas as frequências) ou ruído rosa (diminuição gradativa de potência do sinal à medida que a frequência aumenta)

a depender da finalidade da medição. O primeiro é usado em medições de isolamento acústico, já o ruído rosa é utilizado em medições de condicionamento acústico;

- Análise acústica da dinâmica não-linear através da medição da distorção harmônica em várias ordens por sinal acústico de onda pura: *sweep sine* (varredura). O método é chamado de resposta integrada ao impulso (ISO, 2008) e pode ser utilizado tanto para medições de condicionamento acústico, quanto para isolamento acústico.

Este trabalho fez uso de ambos os procedimentos descritos acima para obter dados para parâmetros específicos, por exemplo: a resposta ao impulso com ruído branco foi utilizada para obtenção de diferença de nível (D) no objeto de estudo; já a análise por medição através do método de resposta integrada ao impulso foi utilizada para obter o tempo de reverberação (TR60) e análise do campo difuso por decaimento.

**Figura 13:** Equipamentos usados em medições *in situ*.



Fonte: O Autor (2018).

### a) Room EQ Wizard (REW)

Um dos *softwares* utilizados neste trabalho é o *Room EQ Wizard*, *software* gratuito e acessível na internet. O programa emite o sinal “*sweep sine*” (figura 14), um

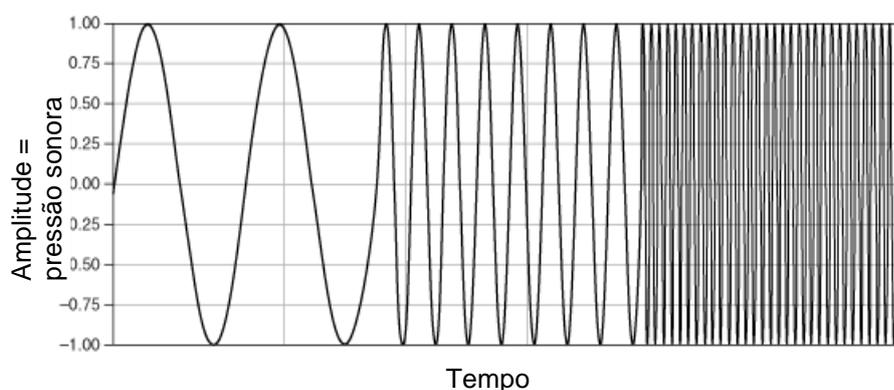
estímulo de onda pura senoidal e gradual que “varre” a sala de 20Hz a 20kHz com a mesma amplitude.

As técnicas para analisar as distorções harmônicas de uma sala são: MLS (*Maximum Length Sequence* – sequência de alcance máximo) e TDS (*Time Delay Spectrometry* – espectrometria de tempo de atraso).

Este *software* de medição acústica possui diversas ferramentas de análise, como Tempo de Reverberação (T30), Leq, Cálculo Modal, entre outros, mas seu principal uso é como analisador de espectro acústico baseado na Transformada Rápida de Fourier (FFT – *Fourier Fast Transform*).

A transformada rápida de Fourier contribui para a análise de cada uma das duas técnicas (TDS e MLS) e simplifica o processo de medição com apenas um estímulo acústico: o sinal *sweep sine* (FARINA, 2000). Este procedimento é descrito na norma ISO 18233 (ISO, 2006) e também é aceito na ISO 3382-2 (ISO, 2008).

**Figura 14:** Representação gráfica do sinal *sweep sine*.

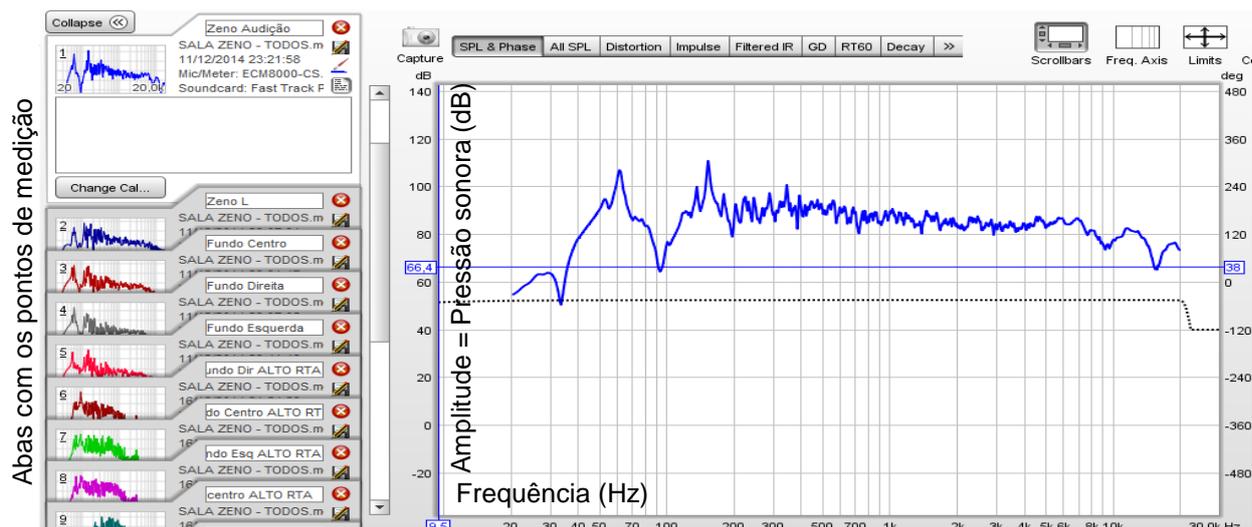


Fonte: Adaptado de ROOM EQ WIZARD HELP (2017).

Enquanto o sinal é reproduzido pela fonte omnidirecional, o *software* capta, através do microfone, a resposta instantânea ao impulso sonoro da fonte e segue calculando o decaimento sonoro na sala na faixa de frequências selecionada.

Todo esse processo é analisado em milissegundos pelo programa e resulta em diversos gráficos. A figura 15 apresenta a resposta acústica instantânea (Leq) de uma sala. Decaimento sonoro é a perda de energia do impulso inicial gerado pela fonte sonora em função do tempo. Essa análise se dá por frequências e o REW gera diversos gráficos e diagramas que serão apresentados das figuras 16 a 19.

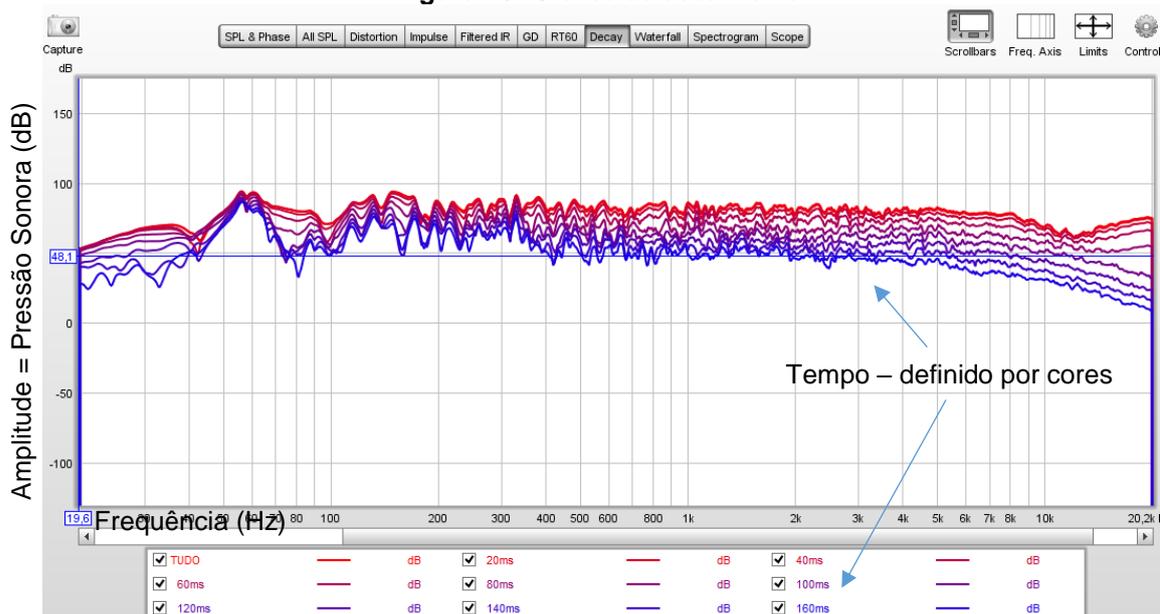
**Figura 15:** Gráfico de resposta acústica instantânea de uma sala qualquer.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

**Decaimento (fig.16):** apresenta toda a linha de resposta acústica da sala em um determinado intervalo de tempo (vermelho – estímulo instantâneo / azul – decaimento desse estímulo). Com este diagrama é possível analisar, com clareza, o comportamento da resposta de todas as frequências em momentos específicos do decaimento com intervalo até 3000 milissegundos (ROOM EQ WIZARD, 2017).

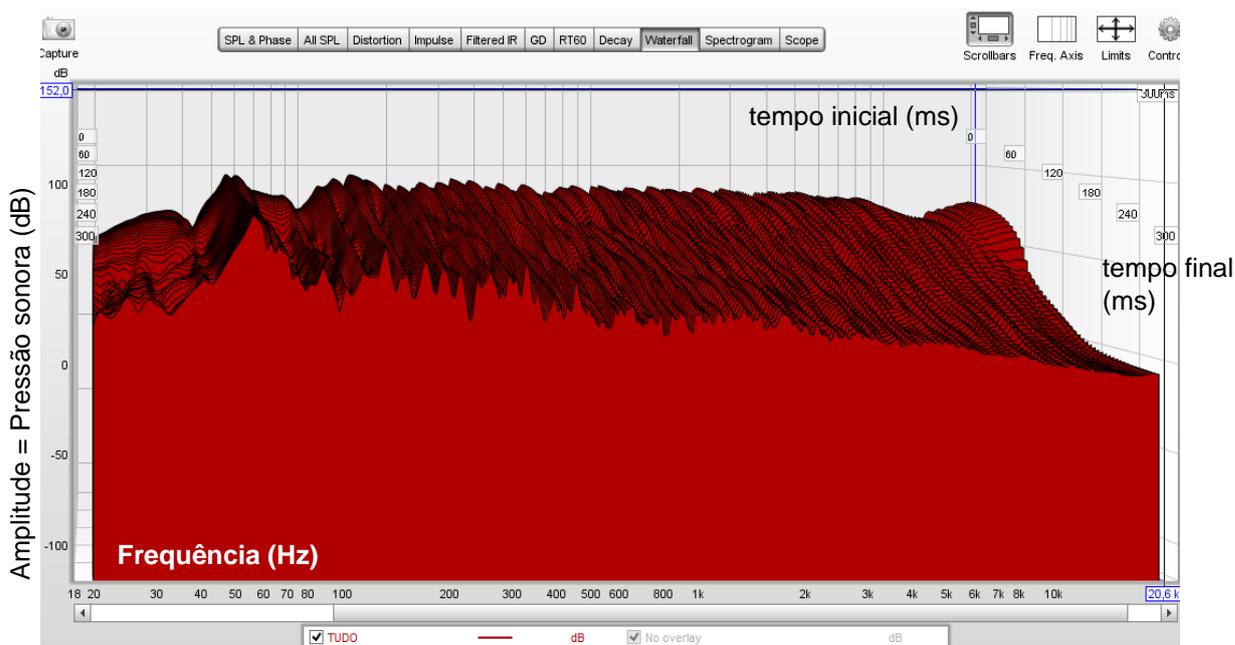
**Figura 16:** Gráfico de decaimento.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

**Cascata (fig.17):** possibilita uma análise do decaimento da resposta das frequências de acordo com um intervalo de tempo maior: até 9 segundos (ROOM EQ WIZARD, 2017).

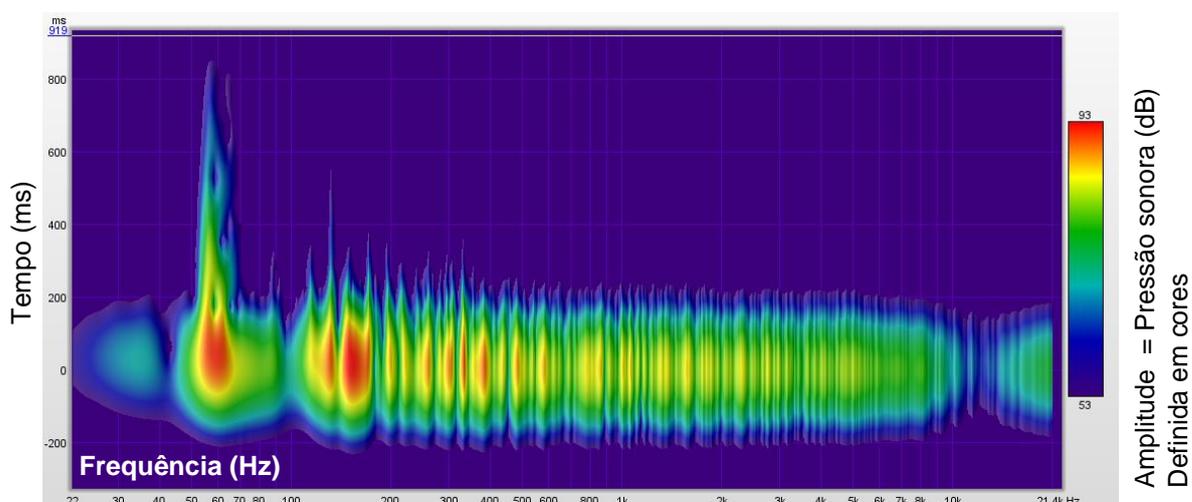
**Figura 17:** Gráfico de cascata.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

**Espectrograma (fig.18):** também possibilita uma análise em conjunto das frequências em função do tempo (até 3 segundos) a partir de um diagrama demarcado por cores. As cores definem o nível de pressão sonora máximo e mínimo da frequência em questão (ROOM EQ WIZARD, 2017).

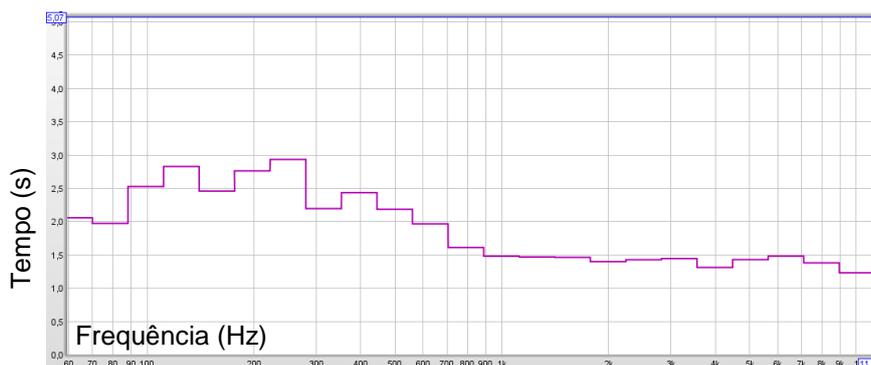
**Figura 18:** Gráfico de espectrograma.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

**Tempo de Reverberação (fig.19):** O *Room EQ Wizard* monitora o gráfico de tempo de reverberação (T30) em bandas de oitava ou terços de oitava de 63 Hz a 10kHz representados em gráfico de barras (roxo).

**Figura 19:** Gráfico de tempo de reverberação (T30).

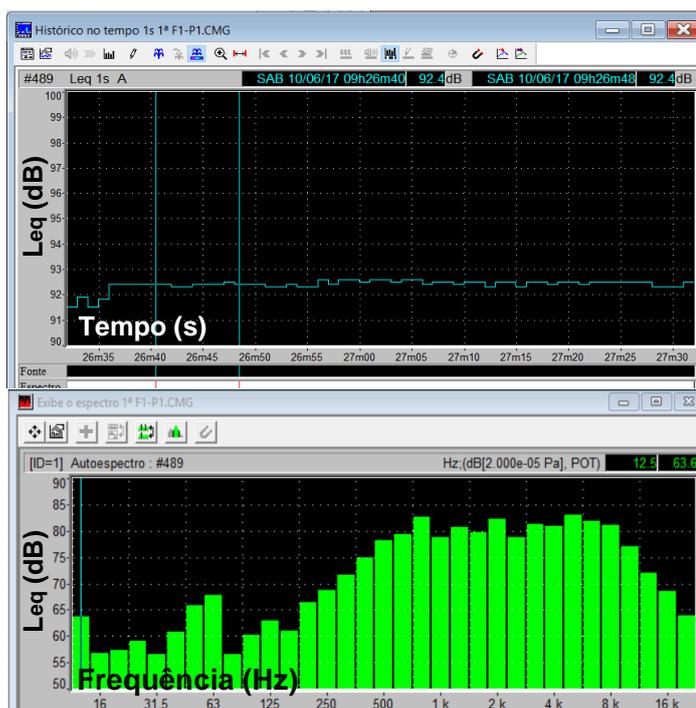


Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

### b) dB Bati 32 e dB Trait 5.4

Outro conjunto de *softwares* utilizados para análise de ruído *in loco* é o dB Bati 32 e o dB Trait 5.4, da empresa francesa ACOEM. São softwares pagos que acompanham o sonômetro, aparelho capaz de medir a pressão sonora dos ambientes. Os sonômetros podem ser utilizados de diversas maneiras: independentemente, medindo o ruído ambiental com ou sem o uso de fontes sonoras (ABNT, 2000); ou conectado a um computador, obtendo valores de tempo de reverberação, por exemplo. Os detalhes do uso do sonômetro são apresentados no capítulo 3.

**Figura 20:** Gráficos gerados pelos *softwares* dB Trait 5.4 e dB Bati32.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

Os gráficos apresentados na figura 20 mostram os valores de  $L_{eq}$  globais, de uma medição em uma situação qualquer, em função do tempo (superior) e a média de  $L_{eq}$  por frequência, representadas em bandas de terços de oitava, podendo também ser apresentados em bandas de oitava e com filtros de ponderação, a depender do nível de aprofundamento da pesquisa.

### 2.3.2. Simulação computacional

Soluções analíticas e teóricas baseadas em cálculos foram desenvolvidas para serem aplicadas a qualquer situação e qualquer geometria do ambiente estudado. Contudo, a teoria ondulatória é limitada a geometrias simplificadas. As geometrias complexas de edificações e as situações com grande quantidade de variáveis e condicionantes criam cálculos com alto nível de complexidade, exigindo o uso de *softwares* que se baseiam na propagação retilínea entre fonte e receptor levando em conta, também, as complexidades e variações da geometria das salas (BRANDÃO, 2016).

Os estudos iniciais de modelagem computacional da acústica de salas é datam da década de 1960 por Manfred Schroeder, propondo a substituição de maquetes em escalas reduzidas para simulação. Na Acústica Geométrica, o campo sonoro é interpretado como vetores (raios) dotados de energia, direção, sentido e seu deslocamento é avaliado em função do tempo.

A “auralização” é uma técnica capaz de transformar os modelos matemáticos em arquivos de áudio. Os métodos utilizados para a Acústica Geométrica são: o “raio traçado”; as “fontes virtuais”; ou a união de ambos, sendo chamado de “método híbrido” podendo fazer o uso do método do traçado de pirâmides. (VORLÄNDER, 2008).

Já o mapeamento sonoro, é uma técnica produzida desde a década de 60 em diversos países. Dentre suas contribuições, destacam-se a possibilidade de:

- Quantificar o ruído o qual a população é exposta;
- Ser uma base de dados útil ao planejamento urbano para as devidas intervenções e planos de ação visando obter níveis de ruído adequados para a área analisada / localização de áreas ruidosas e áreas sensíveis ao ruído;

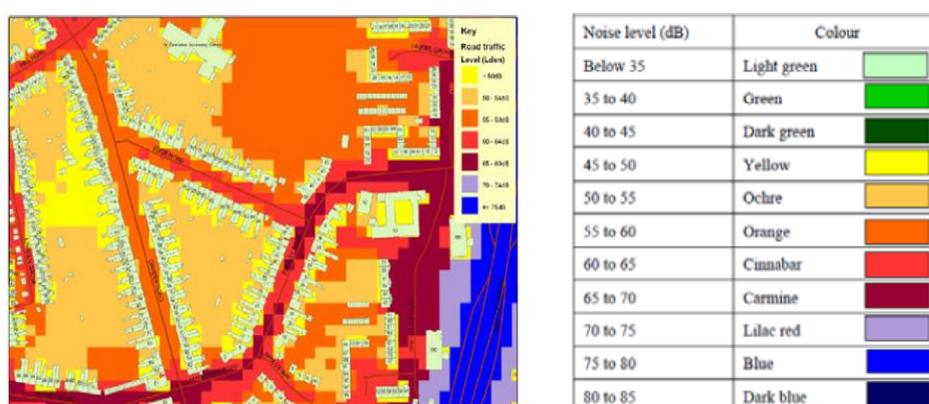
- Modelar e ilustrar cenários de impacto sonoro futuro de construções, tráfego, ou fábricas ainda na fase de projeto (OLIVEIRA, 2017).

A elaboração dos mapas pode usar as metodologias (MICHALSKI, 2017):

- Método experimental: através de medições, obtém-se com precisão os dados de todas as fontes de ruído. Como ponto negativo, levanta-se o custo, o tempo para a realização e a falta de levantamentos de referência;
- Método previsional: possibilita a criação de cenários simulados com custo e tempo reduzidos, mas a falta de dados básicos podem trazer erros relacionados;
- Avaliação qualitativa: avaliação do incômodo através de entrevistas. No entanto, a variação de respostas pode aumentar a dimensão da amostra em função de particularidades dos entrevistados.

A ilustração dos mapas de ruído é dada segundo padrões definidos em normas internacionais, a primeira que citou o padrão de cores foi a ISO 1996-2 de 1987 (ISO, 1987), entretanto, em sua reedição, em 2007, esta informação foi suprimida, mas a convenção para este padrão permanece. Uma das normas que manteve essa padronização é a norma alemã DIN 18005, que define, em um intervalo de 5 em 5 dB, o nível de ruído em determinados pontos para a geração dos mapas de ruído (LORETO et al., 2016).

**Figura 21:** Padrão internacional de cores para NPS em mapas de ruído.



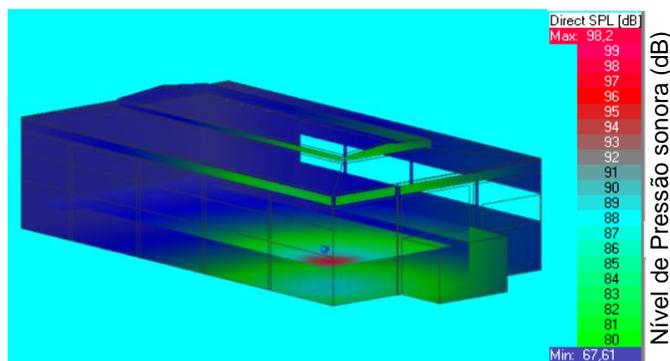
Fonte: Adaptado de MICHALSKI (2017).

### a) EASE 4.3

O *software* EASE 4.3, da empresa alemã AFMG, permite o estudo de salas em Acústica Geométrica, baseado no método do raio traçado (BRANDÃO, 2016). Ele

avalia as reflexões internas, zonas de alta e baixa pressão sonora por frequência e os parâmetros resultantes dessa interação no modelo virtual.

**Figura 22:** Simulação computacional gerada pelo *software* EASE 4.3.



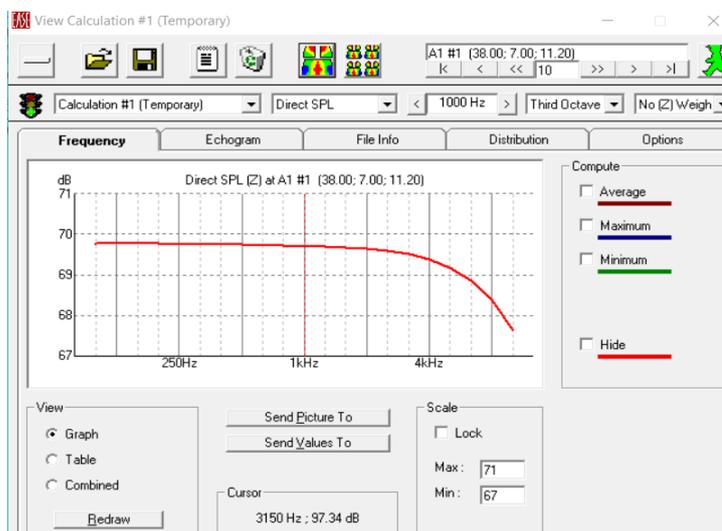
Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

A figura 22 mostra um dos diversos mapeamentos que o EASE 4.3 oferece:

- Pressão sonora – som direto unicamente (situação inexistente na natureza);
- Pressão sonora – som direto e som difuso (situação natural, real);
- Parâmetros de qualidade acústica (não utilizados nesta pesquisa) – C50, C80, D50, ITDG, entre vários outros;
- Tempo de reverberação.

O *software* também oferece diversos gráficos desses parâmetros (fig. 23), bem como possibilita a exportação dos dados para a criação de planilhas. Também proporciona o recurso da auralização, que possibilita o projetista ouvir, através de arquivos de áudio, a resposta acústica das salas antes e após a intervenção projetual.

**Figura 23:** Gráfico de resposta acústica gerado pelo *software* EASE 4.3.



Fonte: Adaptado pelo Autor (2017).

## b) Noise 3D

Para a simulação de ruído ao ar livre, o *software* Noise3D, da empresa alemã Infotmatik GmbH, foi disponibilizado. Seu funcionamento ocorre como plugin dentro acoplado a outro *software*, o Trimble Sketchup, tornando-o capaz de calcular a propagação sonora de ruído em ambientes abertos sob as diretrizes da norma ISO 9613-2 (ISO, 1996) bem como avaliação de ruído de tráfego de acordo com normas alemãs (KRAMER; CHRISTIANSEN, 2017).

O método do Noise 3D é o previsional. Os dados serão obtidos nas medições no local do objeto de estudo e assim comparados aos valores simulados, proporcionando a ilustração do mapa de ruído do entorno do recinto analisado. A alimentação do *software* se dá ao passar os dados obtidos *in loco*: a média de veículos, o Leq médio global registrado no sonômetro e detalhes sobre a perda de transmissão sonora das fachadas (valor padrão: 1dB de perda).

**Figura 24:** Simulação computacional gerada pelo *software* Noise3D.



Fonte: NOISE 3D (2017).

Para ser gerado o mapa de ruído, primeiro os dados da região de interesse deve ser levantada com o uso de um sonômetro e com a contagem de veículos. Após isso, no Noise 3D, o usuário faz o download da região estudada via *Google Maps* e cria a área virtualmente – em 3D – dos prédios, vias, sinais de trânsito e vegetação que compõem a área.

Assim, os conceitos teóricos, equipamentos de medição acústica, dispositivos acústicos, e *softwares* de simulação baseados em Acústica Geométrica, *softwares* de mapeamento sonoro e *softwares* de análise de medições de resposta ao impulso são as ferramentas que asseguram o trabalho do projetista acústico para alcançar os níveis de parâmetros acústicos definidos em normas para qualquer tipo de situação.

## 2.7. Observações principais do capítulo

Neste capítulo, foram apresentadas diretrizes arquitetônicas e de conforto ambiental definidas em teorias e normas técnicas nacionais e internacionais. Estabeleceu-se um comparativo entre as informações presentes em normas de ruído brasileiras e inglesas. Notou-se que os níveis sonoros para o conforto acústico de ginásios poliesportivos ingleses são mais exigentes que no Brasil pelo fato da referência ser o ruído no exterior do ambiente, não em seu interior.

Ou seja, se o ruído em seu entorno deve ter baixos níveis, espera-se que o som produzido no interior do local seja controlado a ponto da curva NR 40 continuar sendo respeitada quando o ginásio estiver em uso, permitindo a seguinte indagação: os esportes na Europa são praticados sem envolvimento do público? Os ingleses torcem de maneira polida o suficiente a ponto de não gerarem ruído? Não é o que se vê, nos campeonatos ingleses de futebol por exemplo, um dos maiores do mundo. São algumas incoerências percebidas nesses levantamentos.

Alguns modelos de plantas presentes nos ginásios sequer apresentam arquibancadas, o que corrobora a suposição de que os jogos nesses locais são, por si só, silenciosos, onde as únicas fontes de ruído seriam dos atletas, juntamente com o apito do juiz (se houver). A pesquisa de Conetta *et al.* (2003) mostra que uma considerável parcela de ginásios levantados não atendem os requisitos.

Também foram apresentadas normas e legislações brasileiras a respeito de níveis e controle de ruído externo e interno de ambientes, mostrando também o cenário da cidade de Maceió a respeito da pouca importância dada ao conforto acústico, que não é apresentado com clareza em seu Plano Diretor, que certamente ganharia consistência se as diretrizes normativas para ruído fossem seguidas.

Mas até que ponto as legislações transformam-se em ações efetivas? No âmbito do mercado imobiliário, para a obtenção de alvará de construção de edificações que impactam no entorno, foi instituída a obrigatoriedade de desenvolver o EIV (Estudo de Impacto de Vizinhança), que é um documento capaz de atestar, mediante parecer técnico de equipe multidisciplinar em impacto ambiental, o nível de interferência desde o planejamento da obra até o pleno funcionamento dessas construções, muito embora os levantamentos acústicos sejam ainda limitados e pouco aprofundados no campo da avaliação de ruído ambiental.

Por outro lado, no que se refere à qualidade interna das edificações, a NBR 15.575:2013 foi recebida com interesse pelas construtoras em todo o Brasil por haver também forte demanda do mercado (SINDUSCON, 2015) que, do ponto de vista da acústica arquitetônica, exige ambientes com, no mínimo, mais privacidade entre partições e maior proteção contra o ruído externo, trazendo assim maior conforto ao usuário final dessas construções. A NBR 15.575:2013 não foi citada por não se aplicar à situação específica de ginásio como fonte de ruído impactante na paisagem sonora de uma vizinhança.

Ademais, o grau de exigência para níveis sonoros definidos nos parâmetros da NBR 10.151:2000, que passa por revisão, e da NBR 10.152:2017, têm valores baseados em índices internacionais de países desenvolvidos, sem considerarem fatores culturais ligados ao uso das edificações, bem como às características construtivas relacionadas às variações de materiais utilizados em diferentes países. A atualização da NBR 10.152:2017 não acrescentou nenhuma modificação relacionando os valores de referência nela estabelecidos com os aspectos culturais do povo brasileiro.

Também foram apresentadas ferramentas de representação e simulação do comportamento sonoro em ambientes abertos e fechados através de *softwares* de simulação de comportamento acústico – reflexões sonoras – em ambientes fechados (AFMG EASE 4.3) e mapeamento sonoro (Noise 3D) que, dentre grande variedade existente no mercado, apenas os que foram utilizados neste trabalho foram introduzidos.

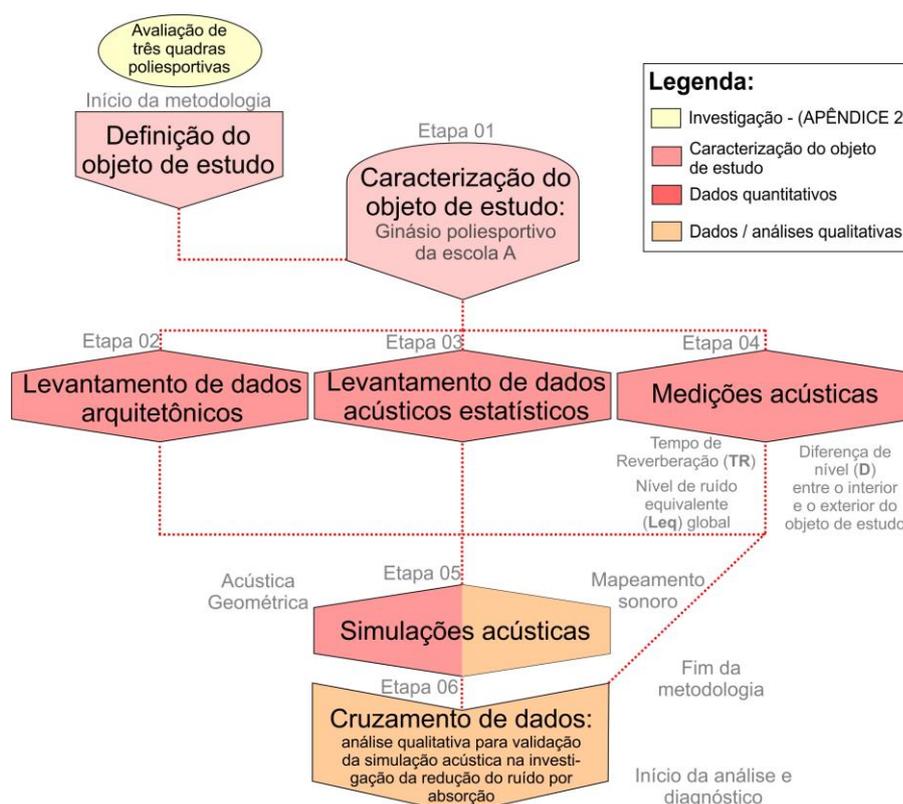
### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada neste trabalho utilizou-se de vários aspectos relevantes relacionados á análise acústica a fim de investigar a redução de ruído por absorção. Os conceitos e teorias que nortearam este capítulo podem ser visitados no Apêndice 1. Dessa forma, foram gerados dados qualitativos e quantitativos, respaldando a investigação da redução do ruído por absorção do ambiente. As etapas foram as seguintes:

- Etapa 01 – Seleção e caracterização do objeto de estudo;
- Etapa 02 – Levantamento de dados arquitetônicos;
- Etapa 03 – Levantamento de dados acústicos estatísticos;
- Etapa 04 – Procedimentos de medições acústicas;
- Etapa 05 – Levantamento acústico geométrico e mapeamento sonoro;
- Etapa 06 – Cruzamento e interpretação de todos os dados obtidos.

A figura 25 apresenta o diagrama metodológico, que retrata o planejamento do trabalho em sua sequência de etapas necessárias para o levantamento de dados do objeto de estudo selecionado visando o objetivo proposto.

**Figura 25:** Estrutura da metodologia.



Fonte: O Autor (2017).

A Tabela 4, a seguir, descreve, de forma introdutória, o conteúdo de cada etapa do diagrama metodológico apresentado na figura 25.

**Tabela 4:** Descrição da metodologia.

METODOLOGIA		
ETAPA	DESCRIÇÃO	
<b>Etapa 01</b> (Objeto de estudo – Seleção e caracterização)	Após o estudo de repertório (APÊNDICE 2), a etapa 01 definiu os critérios para a seleção do objeto de estudo para uma análise aprofundada de suas condições acústicas. Esta etapa apresenta mapas, fotografias de satélite e planta de locação e cobertura do objeto de estudo, juntamente com informações referentes ao impacto sonoro na vizinhança.	
<b>Etapa 02</b> (Levantamento arquitetônico)	O levantamento arquitetônico apresenta perspectivas internas, perspectivas externas, plantas, cortes, medidas, áreas, volume e materiais de suas superfícies internas.	
<b>Etapa 03</b> (Levantamento de dados acústicos)	Dados acústicos como coeficiente de absorção acústica ( $\alpha$ ) dos materiais das superfícies internas do objeto de estudo, tempo ótimo de reverberação para a atividade realizada no recinto e cálculos de A, $\bar{a}$ e TR são apresentados (Acústica Estatística).	
<b>Etapa 04</b> (Medições acústicas – Têm como objetivo a comparação entre métodos e equipamentos de medição. Os dados são aproveitados para comparar e validar a etapa 5)	A norma, <b>BS EN 61672-1:2003</b> (BS EN, 2003), define as condições climáticas recomendadas para o desempenho adequado de sistema eletroacústico. Em ambas as fases (1 e 2) da etapa 04, tais dados foram levantados.	
	<b>Fase 1</b> (TR e Leq global)	Foram realizados procedimentos de medições de tempo de reverberação (TR). Definiu-se o posicionamento entre emissores e receptores, o número de pontos e a seleção do método de resposta integrada ao impulso (ISO, 2008) com sinal de onda pura ( <i>sweep</i> ).  Para a obtenção do <b>Leq</b> (nível de ruído equivalente) global, usou-se fonte dodecaédrica emitindo dois tipos de sinais acústicos: ruído branco e sinal <i>sweep</i> captados por equipamentos distintos (sonômetro e microfone omnidirecional). O objetivo disso é avaliar a confiabilidade dos dados obtidos em métodos e equipamentos distintos para levantamento do mesmo parâmetro e depois cruzar com os dados obtidos nas simulações (etapa 05).
	<b>Fase 2</b> (D)	A diferença de nível ( <b>D</b> ) foi obtida gerando sinal acústico com fonte omnidirecional posicionada no interior do objeto de estudo com o uso de microfone omnidirecional e sonômetros captando o NPS interno e externo do recinto em pontos definidos através dos <b>métodos de resposta integrada ao impulso (ISO, 2006) e medição de ruído estacionário (ISO, 2014)</b> . Os desempenhos de ambos os métodos e equipamentos também foram comparados.
	Os detalhes do método de resposta integrada ao impulso estão descritos na norma <b>ISO 18233:2006</b> , que define o tipo de sinal acústico de onda pura gerado (sinal <i>sweep</i> ) e os procedimentos para a obtenção do parâmetro desejado, que abrange tanto <b>TR</b> quanto <b>Leq</b> e <b>D</b> (ISO, 2006).	
<b>Etapa 05</b> (Simulações acústicas)	<b>Acústica Geométrica</b>	O <i>software</i> EASE 4.3 permite simular diversos resultados de parâmetros acústicos. Foram cruzados os dados das medições com os dados de suas simulações. Para esta investigação, os parâmetros escolhidos foram <b>TR</b> e NPS ( <b>Leq</b> ) no interior do ambiente virtual.
	<b>Mapeamento sonoro</b>	O <i>software</i> Noise3D foi utilizado para representar o ruído no contexto urbano relativo ao entorno do objeto de estudo através de mapeamento acústico.
<b>Etapa 06</b> (Cruzamento de dados – ANÁLISE E DIAGNÓSTICO)	O cruzamento dos dados permitirá investigar a confiabilidade dos diversos procedimentos e equipamentos de medição adotados através da aproximação, ou não, dos valores obtidos para cruzar com a simulação computacional e verificar também se existe aproximação entre seus valores. Esta é a única maneira de descobrir – sem a realização de uma obra no objeto de estudo e com os <i>softwares</i> e equipamentos disponíveis para esta pesquisa – se a simulação da absorção por painéis acústicos trará resultados satisfatórios e condizentes com a realidade.	

Fonte: O Autor (2017).

### 3.1. Etapa 01 – Seleção e caracterização do objeto de estudo

A motivação deste trabalho em estudar espaços poliesportivos ocorreu mediante fato de algumas observações serem levantadas em decorrência que, na cidade de Maceió, grande parte dos recintos dessa natureza projetados não dão atenção à acústica arquitetônica. Para a busca da seleção do objeto de estudo, um estudo de repertório contido no Apêndice 2 foi elaborado e, a partir dele, houve a formulação dos seguintes critérios:

- Ruído gerado internamente no ginásio poliesportivo deveria superar a curva NR 40 (FAHY, 2000), comprovando sua característica ruidosa, que justificasse uma intervenção em acústica;
- A circunvizinhança da edificação deveria ter histórico de reclamação por incômodo sonoro;
- A edificação não apresentar condicionamento nem isolamento acústicos;
- Que a edificação desenvolva atividades multifuncionais;
- Enquadramento da edificação, segundo critérios estabelecidos por Neufert (1998), nos padrões de pequeno ou médio porte.

Mediante análise prévia no Apêndice 2, foi detectado que os ginásios da escola A e do colégio B possuem histórico de reclamações da vizinhança decorrente do ruído gerado nos seus estabelecimentos. No que se refere à escola C, em função da localização de seu ginásio ser afastada de residências, não ocorrem reclamações de ruído pela circunvizinhança.

Ao verificar as atividades desenvolvidas nos três ginásios, observou-se que as mesmas não eram restritivas ao esporte, operando como ambientes multifuncionais, uma vez que são realizadas festas diversas com auxílio de reforço de sistemas eletroacústicos. Quanto ao porte da edificação, foi detectado que, dentre os três ginásios investigados, apenas o da escola A encontra-se dentro das características de médio porte, com área útil de 231,84m<sup>2</sup>. Os outros dois ginásios poliesportivos (colégios B e C levantados no Apêndice 2) possuem dimensões que os enquadram em grande porte, sendo assim descartados da seleção.

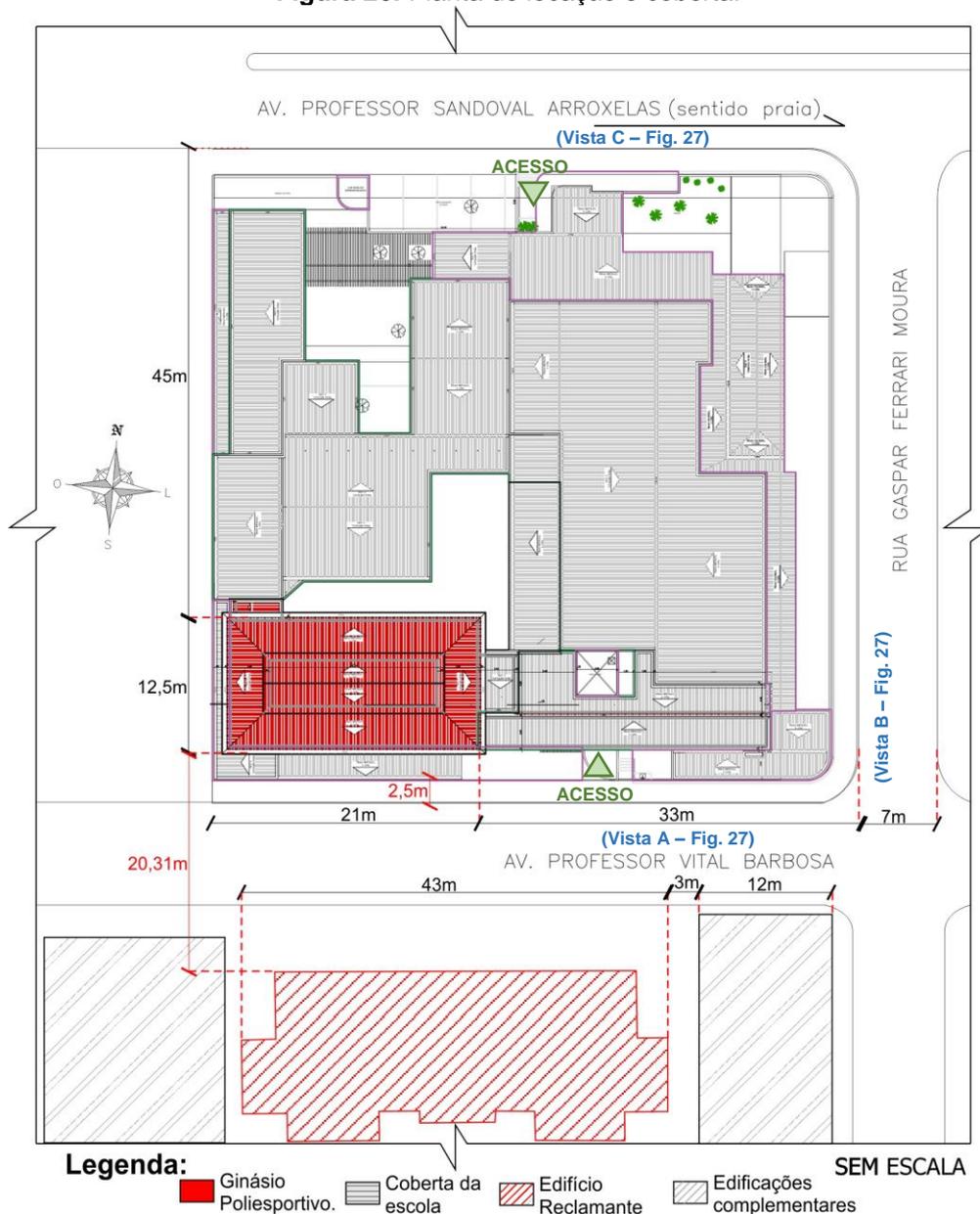
Assim, o objeto de estudo selecionado para o desenvolvimento deste trabalho, dentre as três escolas avaliadas no Apêndice 2, foi o ginásio poliesportivo da escola

A, localizado no bairro da Ponta Verde na cidade de Maceió-AL. Dentre os três ginásios poliesportivos pesquisados no referido apêndice, observou-se que todos estão fora da curva NR 40, como também nenhum apresenta tratamento acústico.

### 3.1.1. Contexto urbano

A escola A selecionada apresenta suas fachadas voltadas para três ruas (figura 26): R. Prof. Vital Barbosa; R. Gaspar Ferrari de Moura e Av. Sandoval Arroxelas. Sendo assim, suas fachadas implantadas no lote compõem duas esquinas.

**Figura 26:** Planta de locação e coberta.



Fonte: O Autor (2017).

A planta de locação e cobertura (figura 26), mostra o posicionamento da quadra poliesportiva (em vermelho), distando 20,31 metros do Edifício Reclamante, 45 metros da Av. Sandoval Arroxelas, 33 metros da Rua Gaspar Ferrari Moura e a 2,50m da Av. Professor Vital Barbosa. A região é caracterizada por intenso tráfego de veículos automotivos (figura 27).

**Figura 27:** Fachadas da escola A.



Fonte: Adaptado de Google Street View (2018).

A visão panorâmica da figura 28 a seguir permite compreender a circunvizinhança do local. Percebe-se que uma das fachadas do objeto de estudo está em frente a um edifício multifamiliar, o edifício reclamante, maior edificação impactada com o ruído do ginásio poliesportivo da escola A.

**Figura 28:** Panorama do entorno da escola A.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2018).

### 3.1.2. O impacto sonoro na circunvizinhança

Analisando o impacto sonoro na circunvizinhança do objeto investigado, verificou-se que a rua Vital Barbosa possui tráfego menos intenso que a Avenida Sandoval Arroxelas, entretanto, o ruído gerado pela passagem de carros na referida rua é notado claramente, afinal, nos horários de entrada e saída de alunos, há uma intensificação em função deste complexo educacional possuir acessos voltados para ambas as vias citadas, o que aumenta consideravelmente a amplitude do ruído gerado na vizinhança por conta do som dos veículos automotivos (buzinas, freadas, etc.).

No que se refere às reclamações da vizinhança ocasionadas pelo ruído deste ginásio em eventos e aulas, a figura 29, a seguir, ilustra a situação. As ocorrências referentes ao ruído do ginásio vêm dos moradores, principalmente do 2º e do 3º pavimentos, do Edifício Reclamante, que apoiados no Estatuto das Cidades (BRASIL, 2001), costumam registrar queixas, principalmente na ocorrência de festividades.

**Figura 29:** Circunvizinhança do objeto de estudo.



Fonte: Adaptado de Google Street View (2018).

Analisando o projeto arquitetônico do ginásio, observa-se que um dos indícios mais evidentes relacionados ao problema de ruído decorrente, em grande parte, vem das aberturas da área esportiva da escola que são voltadas para a rua Prof. Vital Barbosa. Esse ruído gerado na quadra ganha maior diretividade principalmente ao segundo e terceiro pavimentos do edifício, onde sua fachada dista apenas, 20,3 metros da abertura do objeto de estudo selecionado.

Em períodos de festividades na escola A (figura 30), o espaço da quadra poliesportiva é aproveitado por proporcionar uma maior aglomeração de pessoas.

Assim, o ruído gerado nesses momentos é agravado por conta do uso de sistemas eletroacústicos utilizados para o desenvolvimento dessas atividades, que elevam o nível de pressão sonora em todo o recinto. Esse problema faz com que haja a necessidade de controle acústico no local.

**Figura 30:** Festividades, treinamentos e eventos esportivos no objeto de estudo.



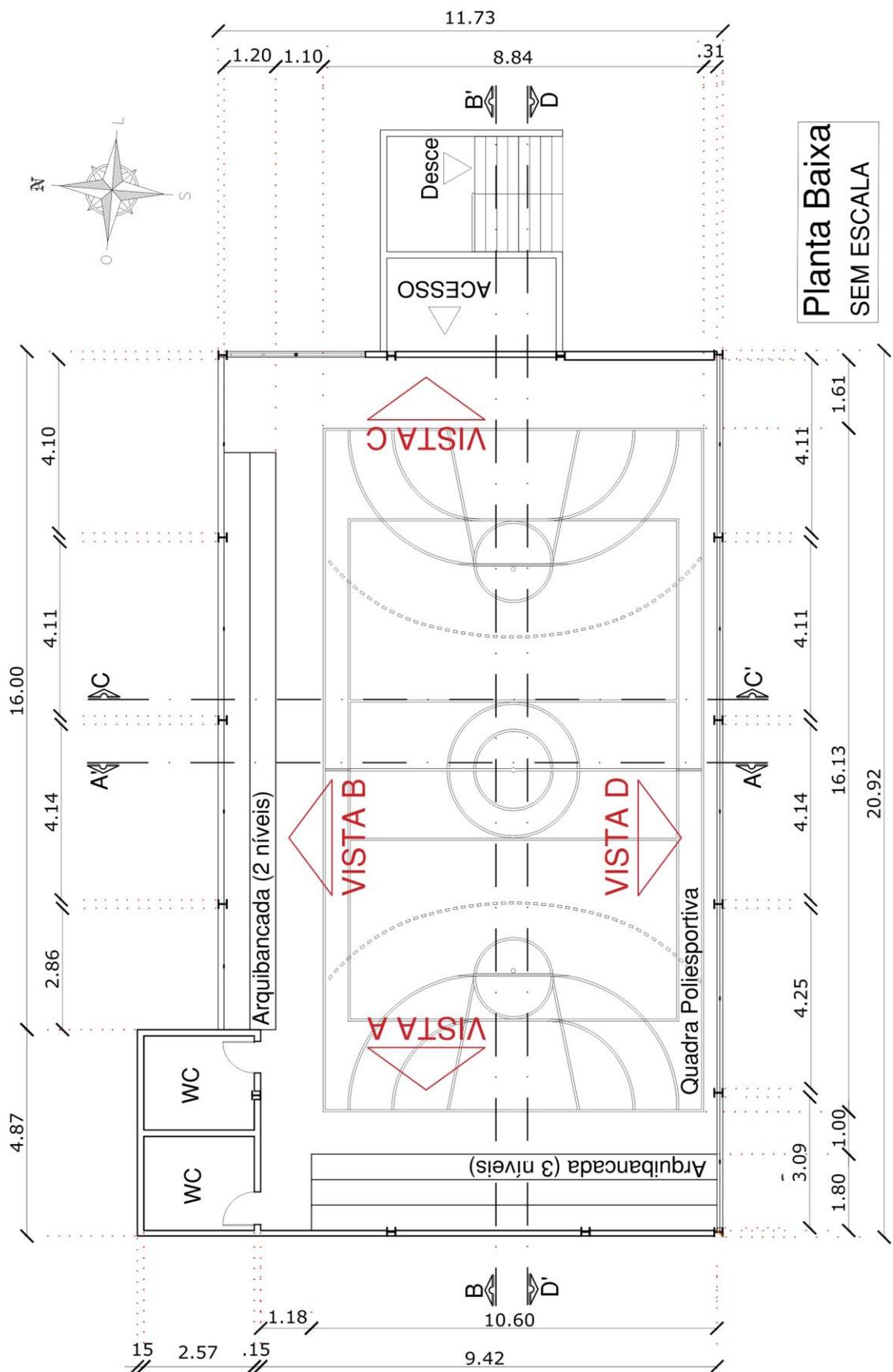
Fonte: O Autor (2017).

As fotografias que retratam a área interna do objeto de estudo evidenciam a ausência de materiais que contribuam no isolamento e condicionamento acústicos em suas superfícies internas, atualmente reflexivas. Pode-se observar que o conjunto de aberturas laterais existentes permitem a focalização e o direcionamento do som para os andares com maior índice de reclamação por ruído do Edifício Reclamante.

### 3.2. Etapa 02 – Levantamento de dados arquitetônicos

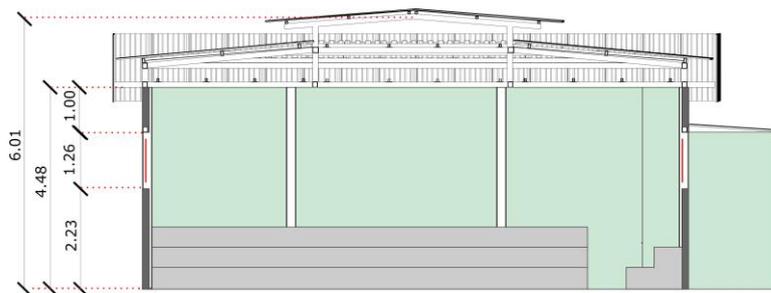
Para análise do objeto de estudo, foram levantados os dados referentes às suas dimensões, volume, áreas e materiais constituintes de suas superfícies internas, bem como características construtivas. Os desenhos técnicos, apresentados nas figuras 31 e 32, mostram as cotas gerais do objeto de estudo, a geometria do ambiente, esclarecendo as aberturas que direcionam o ruído para a vizinhança.

Figura 31: Planta baixa.

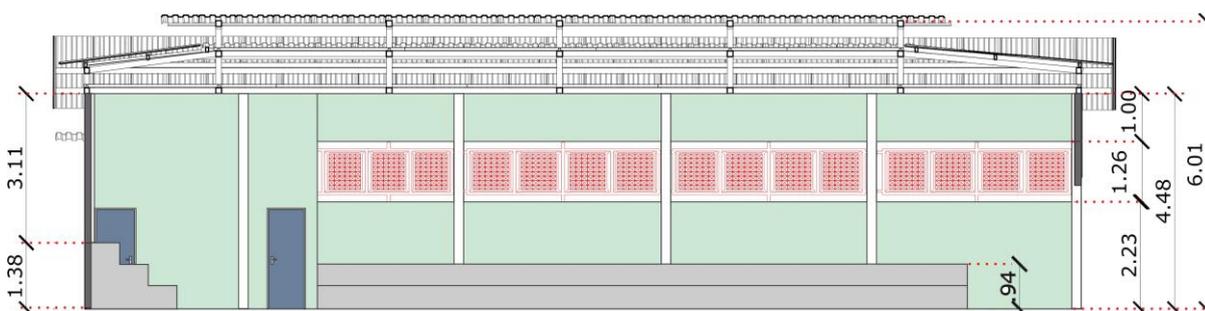


Fonte: O Autor (2017).

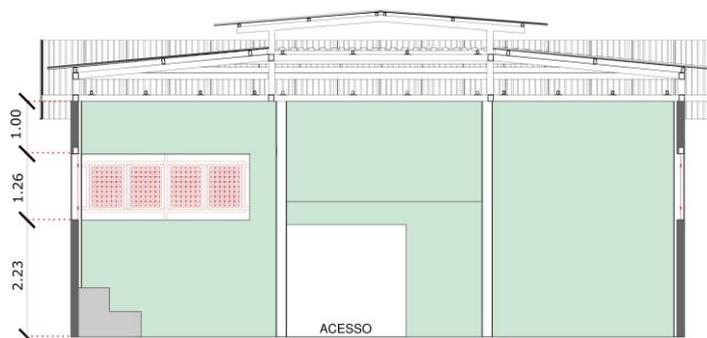
**Figura 32:** Cortes AA', BB', CC' e DD'.



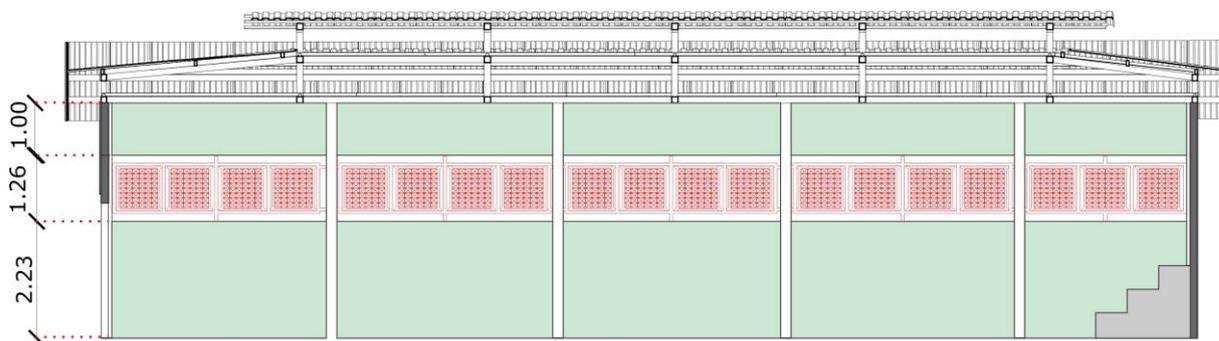
Corte AA' – VISTA A (sem escala)



Corte BB' – VISTA B (sem escala)



Corte CC' – VISTA C (sem escala)



Corte DD' – VISTA D (sem escala)

**Legenda:**

	Corte na alvenaria		Porta de madeira compensada pintada a óleo
	Reboco liso pintado		Concreto liso pintado
	Estrutura metálica		Abertura com gradil
	Telha em alumínio		

A Tabela 5 compila os dados arquitetônicos das áreas das superfícies internas que serão úteis ao cálculo acústico estatístico de tempo de reverberação do objeto de estudo.

**Tabela 5:** Áreas das superfícies internas, área total e volume do objeto de estudo.

Setores	ÁREAS	Unid.	Setores	ÁREAS	Und.
<b>Parede Entrada (VISTA A)</b>			<b>Parede Esquerda (VISTA B)</b>		
Alvenaria	33,321	m <sup>2</sup>	Alvenaria	61,669	m <sup>2</sup>
Metal	5,274	m <sup>2</sup>	Ar (janela)	24,592	m <sup>2</sup>
Concreto	13,794	m <sup>2</sup>	Metal	8,483	m <sup>2</sup>
			Concreto	94,49	m <sup>2</sup>
<b>Parede Fundo (VISTA C)</b>			<b>Parede Direita (VISTA D)</b>		
Alvenaria	35,899	m <sup>2</sup>	Alvenaria	54,086	m <sup>2</sup>
Ar (janela)	4,049	m <sup>2</sup>	Ar (janela)	19,167	m <sup>2</sup>
Metal	5,989	m <sup>2</sup>	Metal	8,072	m <sup>2</sup>
Abertura de entrada	9,623	m <sup>2</sup>	Concreto	12,726	m <sup>2</sup>
<b>Piso</b>			<b>Forro</b>		
Quadra	198,323	m <sup>2</sup>	Telha de Alumínio	236,63	m <sup>2</sup>
Concreto	33,289	m <sup>2</sup>			
<b>Somatório das áreas = 862,963m<sup>2</sup></b>					
<b>VOLUME = 1286,313m<sup>3</sup></b>					

Fonte: O Autor (2017).

### 3.3. Etapa 03 – Levantamento de dados acústicos estatísticos

Juntamente com o levantamento arquitetônico compilado na Tabela 5, o levantamento dos coeficientes de absorção sonora dos materiais que compõem a construção analisada (Tabela 6) são imprescindíveis para os procedimentos de cálculo e enquadramento da edificação nos níveis acústicos desejáveis definidos em normas.

**Tabela 6:** Coeficientes de absorção acústica ( $\alpha$ ) dos materiais da quadra em bandas de oitava.

Material	m <sup>2</sup>	$\alpha$ / Frequências (Hz)						
		125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Reboco liso pintado (paredes)	184,38	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02
Abertura com gradil (ar)	47,81	1	1	1	1	1	1	1
Metal (pilares)	27,82	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Alumínio (telhas)	236,63	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,025
Concreto liso pintado (piso)	352,62	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,018
Porta de madeira compensada pintada a óleo	3,84	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,033
Abertura (duto) de ventilação (acesso)	9,62	0,16	0,20	0,30	0,35	0,29	0,21	0,29

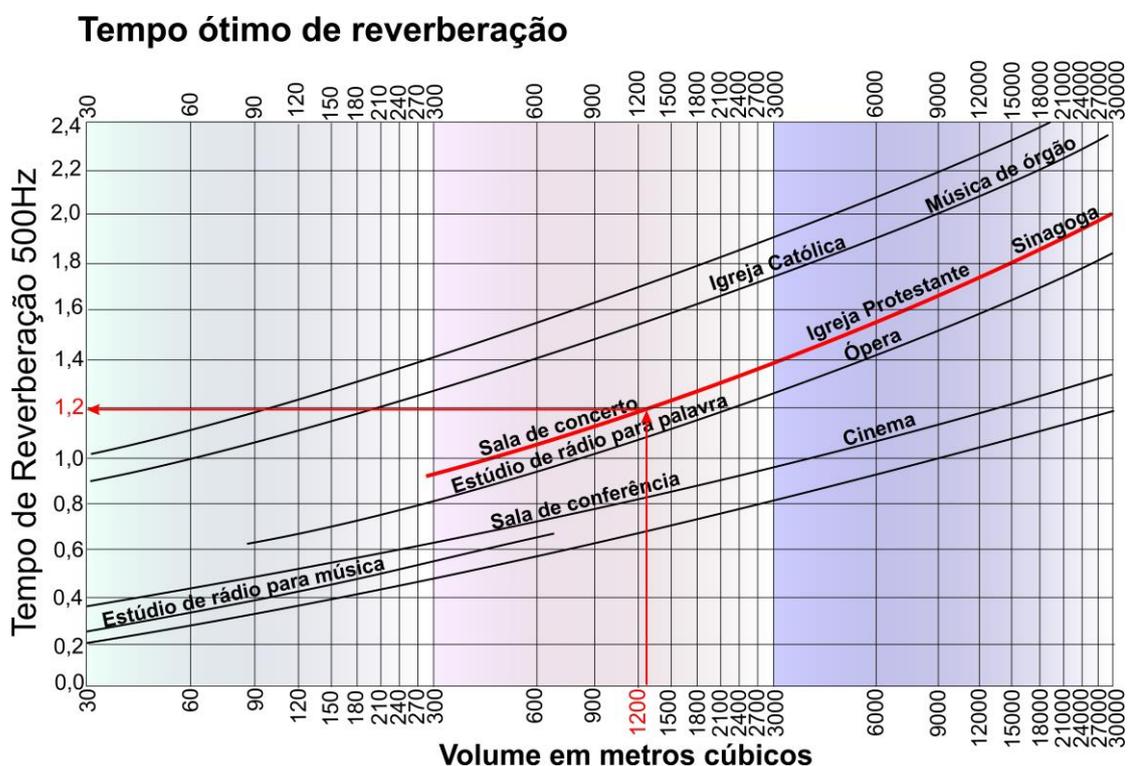
Fonte: O Autor (2017).

### 3.3.1. Tempo ótimo de reverberação

A NBR 12.179 (ABNT, 1992) fixa os critérios fundamentais para execução de tratamentos acústicos em recintos fechados. Essa norma apresenta um ábaco que indica o tempo ótimo de reverberação (em 500Hz) para categorias de recintos em função do seu uso e seu volume (figura 33).

Uma vez que a categoria “ginásio poliesportivo” não existe, cabe ao projetista interpretar o diagrama e enquadrar o objeto de estudo ao uso que se assemelhe. No caso, a quadra poliesportiva, por receber pessoas para atividades esportivas, musicais e culturais, enquadrou-se como “sala de concerto / igrejas”, por serem ambientes multifuncionais.

**Figura 33:** Tempo ótimo de reverberação para o objeto de estudo, em 500Hz.



Assim, o tempo de reverberação ideal, em 500Hz, para uma sala de conferências de volume equivalente a 1286m<sup>3</sup> é, aproximadamente, 1,2 segundo, o mesmo valor para 1kHz a 4kHz. Para 125Hz, 1,2 é multiplicado por 1,3, resultando em 1,56 segundo. Para 250Hz, o valor é multiplicado por 1,15, resultando em 1,38 segundo.

### 3.3.2. Cálculo de A, $\bar{\alpha}$ e TR – Situação original

De acordo com as relações matemáticas apresentadas na seção A1.2.1.a) do apêndice 1 desta dissertação, envolvendo somatório das áreas das superfícies e a multiplicação dos coeficientes de absorção acústica pela área de cada superfície considerando a frequência, temos que, para o objeto de estudo, a absorção total (A) é 409,276 Sabines e o índice médio de absorção ( $\bar{\alpha}$ ) é 47,4%.

Todavia, o valor obtido de “ $\bar{\alpha}$ ” merece comentários, afinal, não há materiais nas superfícies do objeto de estudo capazes de absorver som, como já mostrado na Tabela 6. A parcela responsável pela “absorção” de 47,4% vem das aberturas, ou seja, o som produzido ali evade do recinto amplificado pelas reflexões das ondas sonoras nos materiais de baixo coeficiente de absorção acústica das superfícies internas.

Neste ponto encontra-se a insuficiência de dados gerados através do uso unicamente da Acústica Estatística para avaliar o desempenho sonoro de um ambiente. Por este motivo, o trabalho fez uso de levantamentos de dados acústicos complementares: as medições *in situ* e a Acústica Geométrica.

Ao utilizar a equação de tempo de reverberação de Sabine presente na seção A1.2.1b) do apêndice 1, em 500 Hz, o objeto de estudo apresentou um TR de 2,99 segundos, distante 3,7 vezes maior que o TR ótimo de 1,2 segundos recomendado para sua função e seu volume.

**Tabela 7:** TR do objeto de estudo segundo a abordagem estatística.

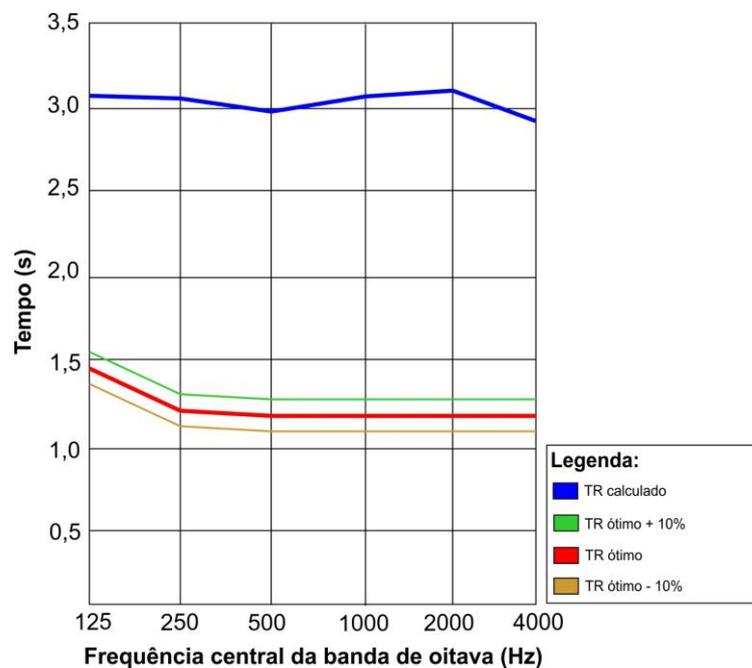
		A = 409,276 sabines		$\bar{\alpha}$ = 47,4%.		
T. REVERBERAÇÃO TR = $0,161 \times V / \sum S \times \alpha$ - Equação de Sabine						
Frequência (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
Tempo (s)	<b>3,070</b>	<b>3,053</b>	<b>2,990</b>	<b>3,074</b>	<b>3,124</b>	<b>2,914</b>
IDEAL	<b>1,56</b>	<b>1,38</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>	<b>1,2</b>

Fonte: O Autor (2017).

O valor de TR da quadra antes do tratamento é útil também para resolver a equação 4 presente na seção 3.4.2d), que define a distância entre os pontos de microfone e fonte sonora para que o procedimento de medições de tempo de reverberação seja realizado. O gráfico 1, a seguir, apresenta o TR ótimo para a faixa de frequências entre 125Hz e 4kHz em bandas de oitava considerando uma margem

de tolerância de mais 10% ou menos 10% para cada um dos valores-base encontrados.

**Gráfico 1:** TR encontrado e TR ótimo por frequências e suas tolerâncias.



Fonte: O Autor (2018).

### 3.4. Etapa 04 – Medições acústicas *in situ*

Para que o nível de ruído ambiente no ginásio gerado por fonte sonora recrie situações de incômodo na vizinhança, o NPS de sinais acústicos emitidos devem ser capazes de propagar ruídos de forma omnidirecional (em todas as direções) e abrangendo todas as frequências que o ser humano é capaz de ouvir. Tanto os sinais acústicos quanto os equipamentos são definidos em normas técnicas.

Por outro lado, Neubauer e Kang (2014) mostram que as definições em normas técnicas não contemplam a subjetividade do ouvinte, promovendo testes acústicos com músicas de gêneros distintos, onde muitas vezes o incômodo se dá por características inerentes ao som, como ritmo, ou frequência capaz de causar irritação.

De qualquer forma, como apenas um sonômetro estava disponível para o procedimento de medição, a situação real de funcionamento do ginásio em eventos não seria possível de ser medida, simultaneamente, em seu interior e exterior, além do fato de que o controle da emissão sofreria grandes variações. Assim, para garantir

o controle dos níveis de emissão de ruído e excluir essa variável desfavorável, o uso da fonte sonora e sinais acústicos definidos em normas contribuiu para aferir a energia acústica e o tempo de reverberação no interior e a diferença de nível sonoro do objeto de estudo em seu interior e exterior.

Nesta etapa, foram utilizados diferentes métodos e equipamentos de medição acústica com a finalidade de comparar os dados obtidos, equipamentos e métodos adotados, bem como avaliar a confiabilidade dos *softwares* de simulação acústica disponíveis para o trabalho e apresentados na seção 2.6.

**Tabela 8:** Fases dos procedimentos de medições acústicas *in situ*.

Fase	Método / instrumentos / softwares	Normas
1	<p><b><u>Análise do campo sonoro difuso – MEDIÇÃO INTERNA</u></b></p> <p>Medição do <b>TR</b> dentro do ginásio – Sinal <i>Sweep</i>.  <b>Leq</b> médio global também dentro do objeto de estudo (campo direto + difuso).</p> <p>2 Métodos de obtenção de <b>Leq</b> foram utilizados para comparação de resultados:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Método de emissão de ruído estacionário:</b> resposta impulsiva por ruído branco dentro objeto de estudo por um minuto. Captado com sonômetro e microfone omnidirecional. Os dados no sonômetro são captados em sua memória interna, enquanto no microfone omnidirecional, o software utilizado para registro foi o REW (<i>Room EQ Wizard</i>);</li> <li>• <b>Método de resposta impulsiva integrada:</b> resposta impulsiva por sinal de tom puro (<i>sweep</i>). Captado unicamente com microfone omnidirecional, pois não era possível conectar o sonômetro ao REW.</li> </ul>	<p><b>TR:</b>  <b>ISO 3382-2 (ISO, 2008) *</b></p> <p><b>Leq médio global:</b>  <b>NBR 10.152 (ABNT, 2017) *</b></p> <p>Normas complementares:  ISO 3382-1 (ISO, 2009)  BS EN 61672-1 (BS EN, 2013)  ISO 18233 (ISO, 2006)  ISO 16032 (ISO, 2014)</p>
2	<p><b><u>Diferença de NPS (D) – MEDIÇÃO INTERNA E EXTERNA</u></b></p> <p>Os métodos clássico (com ruído branco) e de resposta impulsiva integrada (com sinal <i>sweep</i>) no interior e no exterior do objeto de estudo também foram realizados e os resultados investigados.</p> <p>A norma <b>ISO 16032:2004</b> (ISO, 2004) foi consultada pois avalia recintos com fontes de ruído contínuas. É uma norma aplicada a instalações de máquinas em edificações. Entretanto, uma vez que as medições ocorreram com emissão de ruído controlada gerada por fonte omnidirecional e não com o local em funcionamento comum, seus princípios de coleta de dados foram importados para a adaptação ao caso do objeto de estudo.</p>	<p><b>NBR 10.151 (ABNT, 2000)*</b></p> <p>Normas complementares:  BS EN 61672-1 (BS EN, 2013)  ISO 16032 (ISO, 2004)  ISO 18233 (ISO, 2006)  ISO 16283-1 (ISO, 2014)</p>

\* Principal norma de referência. **Softwares:** *Room EQ Wizard* (REW), dBbati32 e dBTrait 5.4

### 3.4.1. Equipamentos utilizados e suas conexões

Os equipamentos utilizados nos procedimentos seguem as recomendações normativas e são descritos na Tabela 9, a seguir.

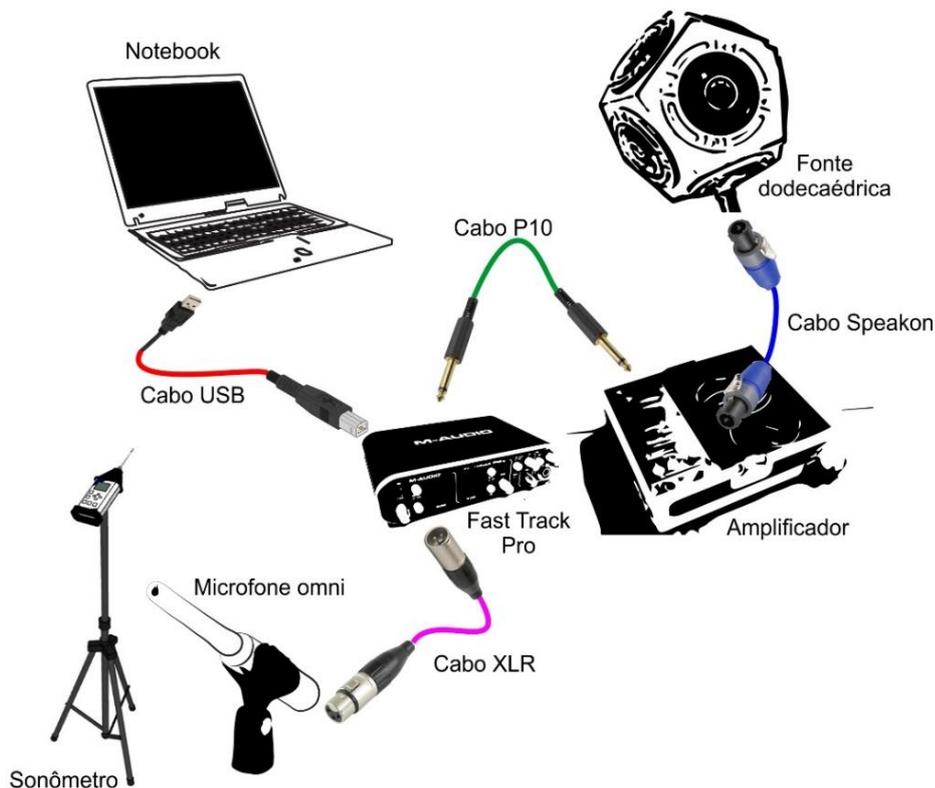
**Tabela 9:** Equipamentos utilizados nas medições acústicas.

ITEM	EQUIPAMENTO	DESCRIÇÃO / ETAPA
1	 <p>Fonte dodecaédrica <b>Marca:</b> GROM / <b>Modelo:</b> DDC-100</p>	<p>Sistema de 12 alto-falantes dispostos em uma base dodecaédrica, atuando em banda larga de frequências. Atende às exigências normativas, apesar de sua fraca resposta para frequências abaixo de 100Hz. Mesmo diante dessa deficiência técnica de resposta aos graves, nenhuma norma obriga o uso de subwoofer para auxílio. <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
2	 <p>Amplificador (potência) da fonte <b>Marca:</b> GROM / <b>Modelo:</b> Hypex PSC2400</p>	<p>Sistema de amplificação da fonte dodecaédrica. <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
3	 <p>Anemômetro, Termohigrômetro e Luxímetro digital <b>Marca:</b> Lutron / <b>Modelo:</b> LM-8000</p>	<p>Aparelho utilizado para o registro de dados de temperatura, velocidade do vento e umidade relativa do ar. <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
4	 <p>Calibrador acústico <b>Marca:</b> RYON / <b>Modelo:</b> NC-74 – CLASSE 1</p>	<p>O aparelho é encaixado à frente do microfone e emite um sinal de tom puro de 94dB em 1kHz para verificação e regulagem da captação feita pelo transdutor (microfone). <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
5	 <p>Sonômetro Classe 1 <b>Marca:</b> 01dB / <b>Modelo:</b> Solo</p>	<p>Instrumento de medição de NPS em função do tempo. Também possibilita a obtenção de dados de TR quando ligado ao <i>software</i> dBbati 32, mas esta função não foi utilizada por necessitar de cabos USB muito longos para ligá-lo ao computador e obter todos os pontos de medição necessários para a consistência dos dados. Foi acoplado a um tripé a 1,20m de altura do piso. <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
6	 <p>Placa de áudio <b>Marca:</b> M-Audio / <b>Modelo:</b> Fast Track Pro</p>	<p>Dispositivo que converte o sinal analógico em sinal digital, podendo ser decodificado por softwares no computador em que é conectado. <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
7	 <p>Microfone Omidirecional <b>Marca:</b> Beringer / <b>Modelo:</b> ECM8000</p>	<p>Transdutor que converte o som em sinal elétrico e manda, via placa de áudio, o sinal captado para o computador. O fato de ser omnidirecional significa que esse dispositivo é capaz de captar o som de todas as direções. <b>Utilizado nas fases 1 e 2.</b></p>
8	 <p>Notebook <b>Marca:</b> Avell / <b>Modelo:</b> Titanium G1513</p>	<p>Dispositivo capaz de processar o <i>software</i> Room EQ Wizard (REW), utilizado nesta fase. <b>Utilizado nas fases 1 e 2</b></p>

Fonte: O Autor (2017).

A figura 34 mostra a conexão dos equipamentos tanto para a fase 1, quanto para a fase 2 da etapa 04 da metodologia. O sonômetro (item 5 da Tabela 9) funcionou independentemente das ligações dos outros equipamentos: captou o ruído residual para a regulação da emissão da fonte sonora e para captar o  $L_{eq}$  (nível de ruído equivalente) nos diversos pontos planejados para as medições apresentados adiante.

**Figura 34:** Conexão dos itens.



Fonte: O Autor (2017).

### 3.4.2. Fase 1 – Medição do TR e $L_{eq}$ global interno

A importância de medir o tempo de reverberação de um recinto se deve ao fato deste parâmetro acústico estar diretamente relacionado ao  $L_{eq}$  global (NPS dos campos sonoros direto e difuso – resposta acústica de um local).

#### a) Horário, condições climáticas, ruído residual e calibração

As medições para conhecimento do TR do objeto de estudo ocorreram no dia 10 de junho de 2017 das 8:00h até às 12:00h. Para este procedimento foram levantadas a umidade relativa do ar e a temperatura ambiente dentro do objeto de estudo que eram, respectivamente, 52,7% e 29,5 °C. A norma BS EN 61672-1:2013

(BS EN, 2013) indica que os valores para as condições climáticas mais adequadas para a performance de um sistema eletroacústico são:

- Pressão do atmosférica = 101,325 kPa (ou 1 atm – nível do mar);
- Temperatura = 23 °C;
- Umidade relativa do ar = 50%.

Após a calibração do sonômetro e do microfone ECM8000 regulando o sinal de entrada na placa de áudio (figura 35), o ruído residual foi medido e foi anotado o valor de 56 dB tanto no sonômetro quanto no *Room EQ Wizard* (REW), o que mostra o primeiro indício de confiabilidade deste *software* gratuito.

**Figura 35:** Medições: umidade do ar e temperatura (a) calibração (b) e medição de ruído residual (c).



Fonte: O Autor (2017).

### **b) Justificativa da escolha do método de medição de TR**

Para a obtenção do tempo de reverberação (TR), dois métodos são aceitos pela ISO 3328-2 (ISO, 2008): o método da interrupção de ruído (chamado de método clássico) e o método de resposta impulsiva integrada. Para esta pesquisa, o segundo método foi o escolhido e é descrito detalhadamente na norma ISO 18233:2006 (ISO, 2006), que é inclusive mencionada e aceita pela primeira norma.

O método de resposta integrada ao impulso é realizado através de processamento digital. O objeto de estudo foi excitado 8 vezes por ponto de medição com um sinal acústico conhecido – chamado *sweep sine* – emitido pela fonte sonora, que “varre”, com mesma amplitude, as frequências de 20Hz a 20kHz por um

determinado tempo (o som é um silvo em tom puro crescente) e é captado, unicamente, pelo microfone omnidirecional. O *software* que gera esse sinal é o REW e, como pôde ser visto na figura 35 anterior, o sonômetro não é conectado para esta finalidade por não haver condições de acoplá-lo a este programa.

Na prática, enquanto a emissão progride, o microfone capta gradualmente e instantâneamente a resposta acústica da sala, frequência por frequência, bem como registra o decaimento sonoro delas. Este procedimento proporciona uma melhor relação sinal-ruído, pois melhora o alcance dinâmico e reduz a influência de ruídos externos. Para a medição de cada ponto, nem a fonte e nem o microfone devem ser movimentados até o fim da emissão do sinal acústico pela fonte através do *software Room EQ Wizard*.

Outro motivo de o 01dB SOLO Classe 1 não ter sido utilizado para captar o TR, é o fato de ser um sonômetro antigo, que só processa esse parâmetro através do método clássico. Para que o método de interrupção de ruído pudesse ser realizado no objeto de estudo e comparado com o método da ISO 18233, seria necessário o uso de cabos USB longos para conectar o sonômetro a outro computador.

O método clássico não foi utilizado por esse motivo, somado ao fato de que é necessário um ruído aleatório (claquete, estouro de balão de borracha, palma ou ruído rosa interrompido) com um alcance de bandas de frequências que atinja os limites captados pelo microfone. A natureza aleatória (estocástica) desse procedimento pode fornecer uma maior diferença dos níveis medidos, gerando dados com valores randômicos, limitando a sua repetibilidade (ISO, 2006).

Já a técnica apresentada pela ISO 18233:2006 (ISO, 2006) defende a aplicação de sinais de excitação determinísticos, ou seja, os procedimentos de emissão e captação do sinal estão interconectados, excluindo-se o acaso e a indeterminação. Dessa forma, o método de resposta integrada ao impulso possui um nível de precisão que permite a repetição do procedimento garantindo a confiabilidade na análise dos dados obtidos nas medições que utilizem o mesmo.

Portanto, a comparação entre os equipamentos se deu unicamente pelo levantamento de nível de ruído equivalente –  $L_{eq}$ . Uma vez que o método de resposta integrada ao impulso por sinal *sweep* é mais confiável que o método clássico (ISO,

2006). Os dados de TR obtidos com o REW foram diretamente comparados com os dados obtidos nas simulações acústicas com o EASE 4.3.

### **c) Justificativa da escolha dos métodos de medição de Leq global**

O NPS global, ou Leq global do objeto de estudo podem ser obtidos utilizando dois métodos (mais detalhes na Tabela 10, a seguir):

- Método de resposta integrada ao impulso por sinal de varredura, também chamado de *swept sine technique*, onde o sinal acústico *sweep* é utilizado (ISO, 2006) emitido pela fonte dodecaédrica. Para o levantamento do Leq com este método, o *software* REW com o microfone omnidirecional foram utilizados. Os gráficos de NPS são gerados apresentando, por frequência, o valor da amplitude, em dB, no instante da medição;
- Método de medição de ruído estacionário: método importado da ISO 16283-1 (ISO, 2014), por considerar o uso de fonte omnidirecional emitindo ruído branco contínuo através do *software* REW, que possui um gerador de ruído branco. A norma ISO 16032 (ISO, 2004) considera a medição de locais com ruído contínuo, como casas de máquinas, sistemas hidrossanitários, etc. Dessa forma, o objeto de estudo foi aferido como sendo uma “casa de máquinas”. O NPS foi medido nos pontos de medição tanto com o sonômetro quanto com o microfone omnidirecional através do recurso RTA (*real time analyzer*), medidor de NPS em tempo real.

A NBR 10.152:2017 determina métodos de obtenção de NPS em ambientes internos. Contudo, o levantamento dos dados se dá com o ambiente em funcionamento, que no caso do objeto de estudo seria um jogo, uma festividade, ou um evento qualquer. O número de medições em espaços de grande volume é alto para excluir as grandes variâncias entre picos de ruído e momentos de silêncio, assim índices de ruído máximo, mínimo e médio são levantados (ABNT, 2017).

Com a finalidade de excluir essa variância na emissão do ruído e obter dados mais concretos, optou-se por realizar as medições com a quadra sem uso e em período sem aula, inserindo a fonte dodecaédrica emitindo ruído contínuo com a finalidade de obter valores que indiquem a resposta do objeto de estudo em função de sua geometria e seus materiais internos, uma vez que as características do ruído

e do emissor são conhecidas, pois o ruído branco emite energia acústica de mesma amplitude em todas as frequências, da mesma forma que o sinal *sweep*.

**Tabela 10:** Normas complementares que nortearam a obtenção de  $L_{eq}$  global.

Norma	Objetivo / justificativa
<p><b>ISO 16032</b> <b>(ISO, 2004)</b></p>	<p>Esta norma é específica para construções que produzem ruídos contínuos ou descontínuos, como casa de máquinas, exaustores, bombas, ventiladores, tubulações, descargas hidráulicas, etc. Dessa forma, optou-se por considerar o objeto de estudo como uma “máquina” produtora de ruído. O método de captação na norma consiste em, por 30 segundos, registrar o ruído dentro do recinto em funcionamento e sem funcionamento. A opção em registrar o ruído branco gerado pela fonte sonora por 1 minuto foi adotada por facilitar o manuseio e o registro com os dois sistemas de captação de ruído utilizados: sonômetro e microfone omnidirecional.</p>
<p><b>ISO 16283-1</b> <b>(ISO, 2014)</b></p>	<p>É uma atualização da ISO 140-4, pela qual o ruído dentro um dos recintos é captado com fonte omnidirecional ligada emitindo ruído branco e também captado no recinto adjacente. O posicionamento dos microfones na sala emissora proporciona várias medições contanto que os mesmos estejam afastados 0,5m das paredes e 1,5m da fonte. Detalhe importante é o fato de que vários pontos são captados dentro do emissor, no entanto, a área máxima permitida para a execução das medições baseadas nessa norma é 250m<sup>2</sup>. Dessa forma, a essência da norma foi “importada” e aplicada no contexto específico do objeto de estudo. A norma também cita uma fórmula de <math>L_{eq}</math> médio (equação 18 – ver apêndice 1) quando obtidos vários <math>L_{eq}</math> diferentes.</p>

Fonte: O Autor (2017).

A obtenção do  $L_{eq}$  global da forma como foi realizada neste trabalho não é definida em norma alguma para ginásios poliesportivos, ou espaços com mais de 250m<sup>2</sup>. O método apresentado reuniu uma série de procedimentos definidos em outras normas.

Assim, foi possível descobrir, por meio do controle de uma fonte sonora conhecida emitindo continuamente um impulso acústico, não só os níveis de pressão sonora do recinto analisado, mas também informações relacionadas à confiabilidade de dados obtidos dos diferentes equipamentos e métodos de levantamento acústico, onde a diferença de investimento para a aquisição de ambos é considerável.

O alto custo para o acesso a equipamentos de ponta é um empecilho a muitos pesquisadores desenvolverem trabalhos em acústica, pois não são todas as faculdades que possuem um sonômetro de qualidade e com certificado de calibração. Uma vez que houve acesso a diferentes tipos de equipamentos de custos variados, foi possível a investigação da consistência dos dados que cada um deles fornecem.

Ademais, com os diferentes dados obtidos nas medições, uma vez que os valores sejam correspondentes, podem ser cruzados com as informações das simulações acústicas do recinto na situação original, sem a aplicação dos painéis absorvedores acústicos. Se os valores de todas as medições e simulações, após análise, tiverem proximidade, o processo de simulação acústica será validado para a avaliação da redução sonora proporcionada por painéis absorvedores.

#### **d) Alocação de emissores e receptores para a obtenção de TR e $L_{eq}$ global**

O posicionamento das fontes (emissores) e dos microfones (receptores), bem como o registro do ruído residual, são detalhes de procedimentos que aumentam a acurácia e garantem a reprodução das medições em outros períodos de medições, permitindo o controle da coleta de dados em estágios evolutivos em um levantamento.

Para o posicionamento emissor-receptor foi escolhido o “método de precisão”, onde, no mínimo, 12 posições independentes entre fonte e microfone são exigidas. O sinal gerado pelo emissor deve ultrapassar pelo menos 35 dB o ruído residual (ISO, 2008; ISO, 2009).

Para TR, o parâmetro utilizado em medições *in situ* é também chamado de T30, pelo fato da diferença entre o ruído residual e da fonte ser de mais de 30 dB e não possui nenhuma diferença conceitual nem quantitativa em relação ao conceito original de tempo de reverberação (BRANDÃO, 2016). Uma vez que o ruído residual registrado foi 56 dB, a fonte sonora foi regulada para operar a 95 dB, 39 dB a mais, enquadrando-se nas exigências normativas.

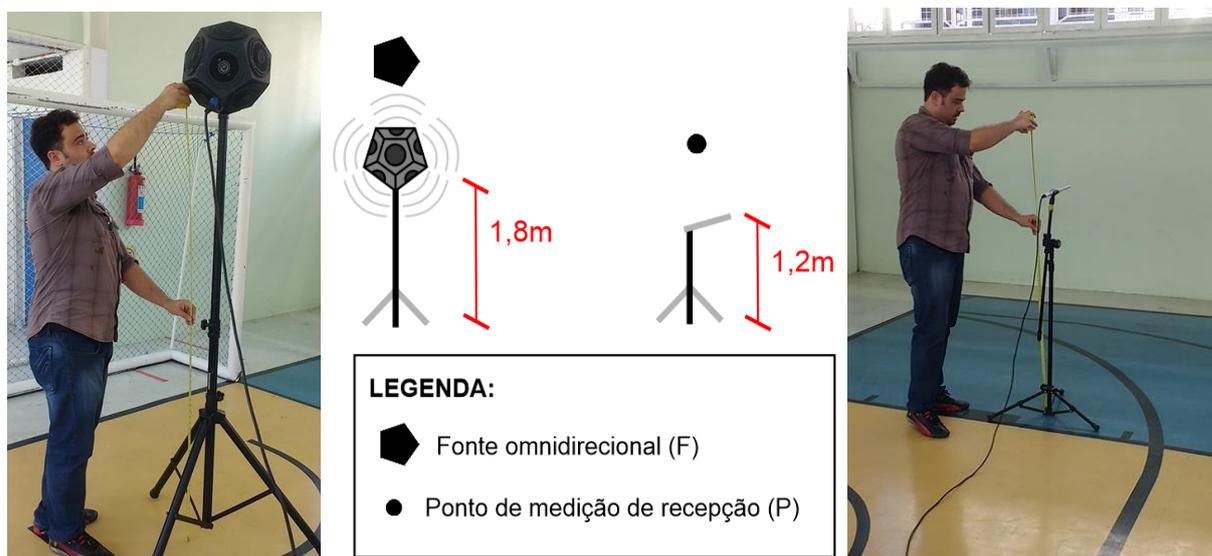
Para este trabalho, os pontos de medição para a obtenção do  $L_{eq}$  global foram os mesmos que os pontos para o levantamento de TR. Entretanto, a NBR 10.152:2017, publicada em novembro de 2017 (SOBRAC, 2017) indica que o número de pontos de medição no interior da edificação para o levantamento das curvas NC,  $L_{Aeq}$  e  $L_{ASmax}$  é no mínimo três. Em edificações com mais de 100m<sup>3</sup>, o número de

pontos de medição somados aos 3 iniciais sobe a cada 50m<sup>3</sup> a mais. Para os 1286m<sup>3</sup> do objeto de estudo, seriam necessários vinte e seis pontos de aferição.

Apenas 12 pontos foram levantados em junho de 2017, 5 meses antes da homologação da atualização da NBR 10.152:2017. Uma vez que essa regra não estava disponível em nenhuma outra norma pesquisada no referencial teórico deste trabalho, arbitrou-se por usar os mesmos pontos definidos na ISO 3382-2, que já configuram como um método de precisão, levantados para a obtenção tanto de TR quanto, dessa vez, para Leq.

A altura da fonte e do microfone em relação ao piso são, respectivamente, 1,8m e 1,2m. A norma ISO 3382-1:2009 (ISO, 2009) sugere que a fonte sonora fique a 1,5m de altura. Em função do pé direito alto do objeto de estudo, optou-se por elevar a fonte 30cm a mais que o recomendado por essa norma com a finalidade de melhorar a distribuição das ondas sonoras distanciando a fonte do chão o máximo possível.

**Figura 36:** Altura da fonte sonora e do microfone em relação ao piso.



Fonte: O Autor (2017).

A distância mínima entre a fonte e o microfone está representada na equação 4 (ISO,2008), já com apresentação dos valores.

Distância Fonte - Microfone:

$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{c\hat{T}}} = 2,23\text{m}$$

(equação 4)

V = Volume do recinto (m<sup>3</sup>) = 1283,31 m<sup>3</sup>  
 c = velocidade do som (m/s) = 345,7 m/s  
 $\hat{T}$  = Tempo de reverberação estimado do recinto (s) = 3 segundos

Na fase 1, os pontos de medição onde os microfones e fontes foram posicionados eram os mesmos tanto para a obtenção do TR quanto do Leq global. Para cada posição, dois sinais foram emitidos:

- *Sweep*, onde apenas o microfone omnidirecional foi ativado;
- Ruído branco acionado por um minuto, onde tanto o sonômetro independente, quanto o microfone conectado ao REW foram utilizados.

Três posicionamentos de fontes sonoras foram definidos, recebendo a nomenclatura de F1, F2 e F3 com distanciamento de 4 metros entre si. Para F1, F2 e F3 foram destinados 4 pontos de medição, totalizando 12 combinações distintas de emissor-receptor, enquadrando, assim, o procedimento de medição no método de precisão (ISO, 2008).

A norma ISO 3382-2:2008 define que os pontos devem ter uma distância superior a 1m das paredes refletoras que delimitam o objeto de estudo. Neste procedimento, o ponto mais próximo à parede estava a 1,80m.

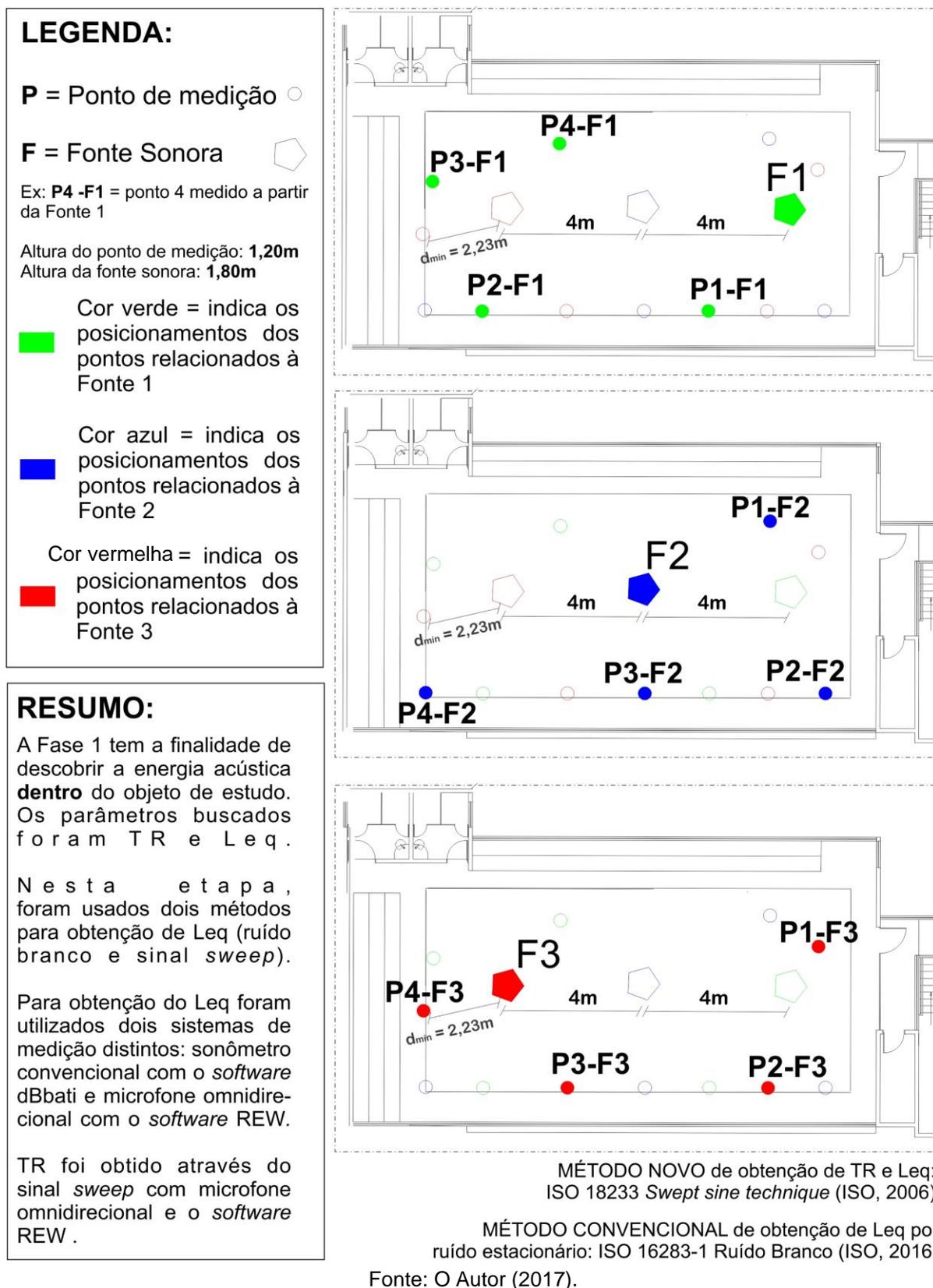
#### **e) Procedimento de medição de TR e Leq global**

O procedimento de medição foi realizado da seguinte maneira: a fonte, o microfone omnidirecional e o sonômetro eram posicionados nos locais planejados, o REW primeiro emitia o sinal *sweep* captado pelo microfone omni e, em seguida, o mesmo *software Room EQ Wizard* emitia, através de seu gerador de sinal integrado ao programa, o ruído branco por um minuto, que foi captado automaticamente pelo sonômetro e pelo microfone omni acoplado a este *software* no modo de análise em tempo real – RTA.

Quando o sinal *sweep* é gerado e captado pelo microfone omni, o REW já obtém automaticamente os valores de TR e Leq quando medidos em cada um dos pontos. Com isso, foram feitas 12 medições para o método de resposta integrada ao impulso, 12 medições para o método de medição de ruído estacionário com ruído branco captado pelo sonômetro e pelo microfone, totalizando 36 gráficos de Leq e 12 gráficos de TR para processamento.

A figura 37, a seguir, apresenta a distribuição das fontes e receptores com considerações resumidas a respeito de todos os procedimentos realizados descritos anteriormente:

Figura 37: Posições emissor-receptor – fase 1 – MEDIÇÃO INTERNA.



Os dados obtidos na fase 1, com as adaptações de normas existentes citadas anteriormente, foram úteis para comparar com os dados da simulação computacional

do *software* EASE 4.3, que fornece o mapeamento do Leq médio da sala e seu TR virtualmente. Todas as funcionalidades e dados dos softwares de simulação utilizados neste trabalho serão apresentadas na seção 3.5.

**Figura 38:** Processo de medição de Leq médio - F1, P1–F1.



Fonte: O Autor (2017).

#### f) Nomenclatura dos dados obtidos para TR e Leq global

A Tabela 11 compila as nomenclaturas para cada um dos procedimentos obtidos nas medições da fase 1 e da simulação acústica com o EASE 4.3 apresentado na seção 3.5:

**Tabela 11:** Nomenclaturas adotadas para a identificação dos dados obtidos na metodologia – Fase 1.

Parâmetro	Nome / Sigla	Descrição
Tempo de Reverberação (TR)	<b>Cálculo</b>	Obtido através da equação de Sabine.
	<b>Medição</b>	Obtido através do método de resposta integrada ao impulso no <i>software</i> Room EQ Wizard (REW).
	<b>Simulação</b>	Obtido pelo método do raio traçado no <i>software</i> EASE 4.3
Nível de ruído equivalente (Leq)	<b>MRBs</b>	Medição de Ruído Branco com o uso de sonômetro. Valores médios obtidos através do método de medição de ruído estacionário.
	<b>MRBmo</b>	Medição de Ruído Branco com o uso de microfone omnidirecional. Valores médios obtidos através do método de medição de ruído estacionário captados pelo REW no modo RTA – <i>Real Time Analyser</i> .
	<b>MSS</b>	Medição com Sinal Sweep. Valores médios obtidos através do método de resposta integrada ao impulso captados pelo REW unicamente com o microfone omnidirecional.
	<b>Simulação</b>	O <i>software</i> EASE 4.3 nomeia o Leq global no modelo virtual como “Total SPL”, configurado como o NPS da soma entre os campos sonoros direto e difuso.

Fonte: O Autor (2018).

### 3.4.3. Fase 2 – Medição de Diferença de NPS (D) – INTERNO E EXTERNO

A fase 2 teve o objetivo de obter o parâmetro D (diferença de NPS), através da obtenção dos valores de  $L_{eq}$  (em dB) interna e externamente ao objeto de estudo para investigar, quantificar e avaliar o impacto do ruído do ginásio na circunvizinhança.

#### a) Horário, condições climáticas, ruído residual e calibração

As medições da fase 2 ocorreram no dia 15 de julho de 2017, a partir das 8 horas da manhã com término às 12 horas (meio dia). A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente no interior e no exterior do objeto de estudo eram, respectivamente, 54,4% e 28,9 °C, valores próximos dos recomendáveis pela BS EN 61672-1:2013 (BS EN, 2013). Todos os procedimentos de calibração da fase 1 foram repetidos e o ruído residual captado dentro da edificação foi 54dB. As conexões dos equipamentos e regulagem de suas alturas também são as mesmas da fase 1.

#### b) Justificativa da escolha dos métodos de medição de D

A NBR 10.151:2000 (ABNT, 2000) sugere que o ruído seja captado no local emissor de ruído e no recinto reclamante. Entretanto, não houve acesso ao Edifício Reclamante para a medição de ruído dentro dos apartamentos de nenhum pavimento. Dessa forma, a avaliação do ruído aconteceu na calçada mais próxima ao ginásio, considerando o som que chega imediatamente à área pública.

Assim, o foco da avaliação de D fica voltado unicamente ao emissor, permitindo uma comparação direta das estratégias de redução de ruído por absorção realizadas no objeto de estudo. Nota-se que procedimento realizado na fase 2 foi semelhante ao procedimento para obtenção do  $L_{eq}$  interno da fase 1.

Porém, a fase 1 levantou uma área que abrangia a quadra poliesportiva como um todo, já o foco da fase 2 foi quantificar o ruído gerado internamente que estava próximo de sua zona de fuga: a R. Prof. Vital Barbosa e o ponto na calçada mais próximo a essa via.

O sinal acústico *sweep* foi ativado para a captação no REW e o ruído branco foi gerado para a captação tanto no microfone omnidirecional quanto no sonômetro. Ambos operaram a 95 dB, com ruído residual a 54 dB. Dessa forma, para cada método, foram feitas 18 medições (figura 39). Como 2 métodos foram utilizados, e em

um desses dois métodos houve, ainda, a avaliação de dois tipos de equipamentos de medição, executaram-se 54 (cinquenta e quatro) medições na fase 2.

O fato da fonte ultrapassar em 41 dB o ruído residual contribuiu para uma melhor compreensão das características do ruído que evade do objeto de estudo, trazendo confiabilidade aos dados colhidos. O ruído branco foi medido durante 1 minuto para cada ponto e o número de carros foi contabilizado nas medições no exterior do ginásio.

Alguns procedimentos definidos em normas específicas para ruído de partições (ISO 16283-1) e ruído de casas de máquinas (ISO, 16032) usados na obtenção do  $L_{eq}$  global na fase 1, também foram seguidas pois determinam a criação de um ruído homogêneo e mensurável dentro e fora do local onde a fonte sonora atua, permitindo a comparação dos dados no interior e no exterior do objeto de estudo.

### **c) Alocação de emissores e receptores para a obtenção de D**

Na fase 2, os mesmos 3 posicionamentos de fonte da fase 1 foram adotados, recebendo a nomenclatura de F1, F2 e F3 com distâncias de 4,5 metros entre si. Dessa vez, os receptores voltaram-se para a parede com a abertura voltada ao Edifício Reclamante e para a calçada da fachada correspondente a essa parede.

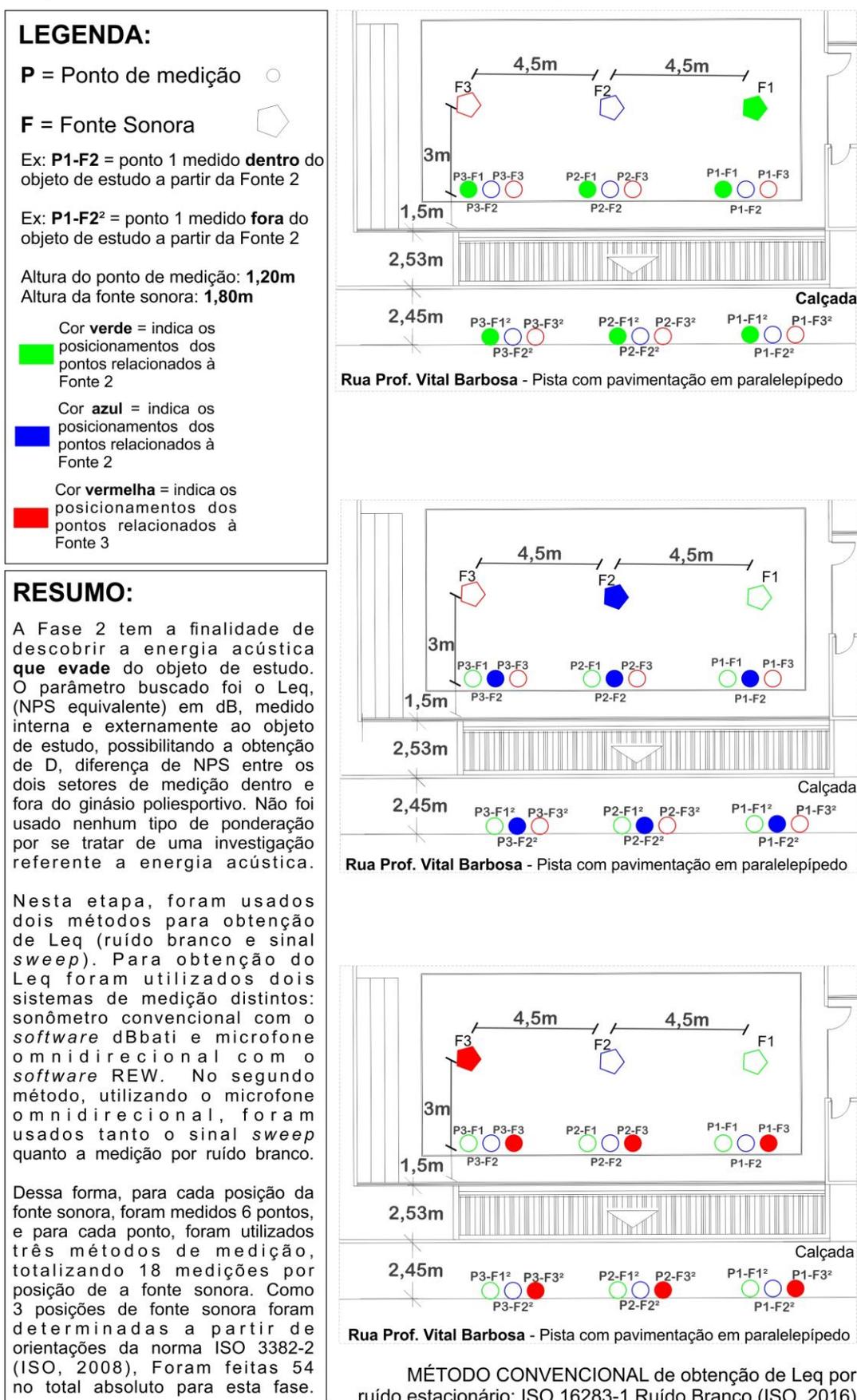
Para cada posicionamento de fonte (F), foram dispostos 6 pontos de medição, 3 no interior da edificação e 3 no exterior, totalizando 18 (dezoito) pontos de medições. A nomenclatura para a relação receptor-emissor no interior é  $P(n^o)$ - $F(n^o)$ , enquanto para o exterior é  $P(n^o)$ - $F(n^o)$  <sup>2</sup>.

### **d) Procedimento de medição de D**

O procedimento de medição foi realizado de maneira muito semelhante à fase 1 no que se refere ao manuseio dos sistemas de captação com o microfone omnidirecional, sonômetro e sinais acústicos emitidos pela fonte dodecaédrica.

A diferença ocorreu na captação dos valores de  $L_{eq}$  no exterior do objeto de estudo, onde cabos XLR (ver figura 34 na seção 3.4.1) de grande extensão foram utilizados para conectar o microfone omnidirecional na placa de áudio, situada no interior do ginásio. Para esse procedimento foi necessária a contribuição de ajudante devidamente treinado para dar apoio no acionamento do sonômetro e na contagem de veículos no exterior da edificação.

**Figura 39:** Posições emissor-receptor – Fase 2 – MEDIÇÕES INTERNA E EXTERNA.



Fonte: O Autor (2018).

**Figura 40:** Processo de medição de D. F1, P1-F1<sup>2</sup> (a) e P1-F1 (b), respectivamente.



Fonte: O Autor (2017).

### e) Nomenclatura dos dados obtidos para D

A Tabela 12 compila as nomenclaturas para cada um dos procedimentos obtidos nas medições da fase 2 e da simulação acústica com o EASE 4.3 apresentado na seção 4.5:

**Tabela 12:** Nomenclaturas adotadas para a identificação dos dados obtidos na metodologia – Fase 2.

Parâmetro	Nome / Sigla	Descrição
Diferença de Nível de ruído equivalente – Leq (D)	RR-i	Ruído Residual interior – captação do ruído no interior do objeto de estudo com fonte desligada.
	RR-e	Ruído Residual exterior – captação do ruído no exterior do objeto de estudo com fonte desligada e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.
	LRBs-i	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por sonômetro em todos os pontos no interior do ginásio A.
	LRBs-e	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por sonômetro em todos os pontos no exterior do ginásio A e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.
	LRBmo-i	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por microfone omnidirecional em todos os pontos no interior do ginásio A.
	LRBmo-e	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por microfone omnidirecional em todos os pontos no exterior do ginásio A e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.
	LSS-i	Média aritmética do Leq obtido por Sinal Sweep captado unicamente por microfone omni em todos os pontos no interior do ginásio A.
	LSS-e	Média aritmética do Leq obtido por Sinal Sweep captado unicamente por microfone omni em todos os pontos no exterior do ginásio A e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.

Fonte: O Autor (2018).

É importante reiterar que um dos objetivos dessas medições é também avaliar diferentes técnicas de medição e os dados obtidos com dispositivos de baixo custo e softwares gratuitos em comparação aos dados obtidos com o sonômetro de Classe 1, uma vez que sua aquisição exige um investimento financeiro maior.

O Leq obtido nas medições para a investigação da diferença de NPS (D) dentro e fora do objeto de estudo servirá para alimentar também o *software* Noise 3D com o valor de emissão sonora a partir da janela do objeto de estudo – etapa 05 – para a geração do mapeamento acústico da vizinhança do objeto de estudo, capaz de ilustrar o ginásio tanto em funcionamento, quanto sem funcionamento.

### **3.5. Etapa 05 – Acústica Geométrica e mapeamento sonoro**

Esta etapa metodológica possibilita criar, virtualmente, diversos cenários para análise acústica possibilitando o planejamento da inserção de dispositivos acústicos da maneira mais eficiente possível. A primeira fase é desenvolver os mesmos cenários da etapa anterior (medições *in situ*), procedimento que detalhado nesta seção.

Os dados obtidos nas medições foram fundamentais para a confecção do mapeamento sonoro do entorno do objeto de estudo. Em seguida, com os dados das medições e das simulações à disposição, compara-se ambos para encontrar semelhanças e diferenças neles e, por fim, a proposta de intervenção na quadra é avaliada. Com as ferramentas proporcionadas pela simulação computacional voltada à acústica, toda e qualquer decisão a respeito das intervenções construtivas torna-se mais fácil de ser analisada e ilustrada, possibilitando uma melhor compreensão do projeto e dos benefícios ao desempenho acústico da edificação.

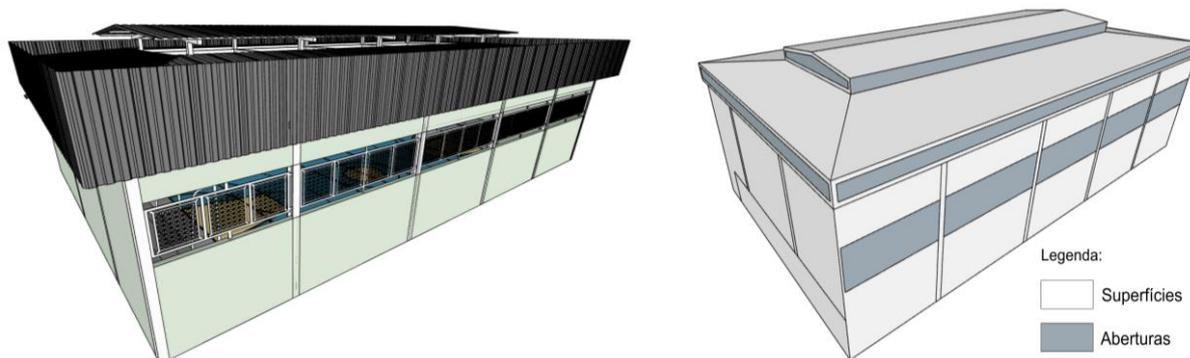
#### **3.5.1. Simulação da emissão sonora dentro do objeto de estudo (fase 1) a partir do uso do *software* EASE 4.3**

Com os dados das propriedades acústicas dos materiais constituintes da edificação, bem como com os dados do levantamento arquitetônico, um modelo em 3 dimensões foi montado no *software* Sketchup Pro 2018. No Sketchup pro, todos os detalhes construtivos são representados e suas medidas são idênticas às medidas

originais da edificação. O *software* EASE 4.3 utiliza os dados geométricos importados do Sketchup Pro: superfícies internas, dimensões e aberturas.

Para a correta interpretação do EASE 4.3 a respeito da geometria interna do recinto analisado, o desenho exportado do Sketchup pro para o programa deve ser leve e com geometria clara o suficiente para o desenvolvimento das simulações.

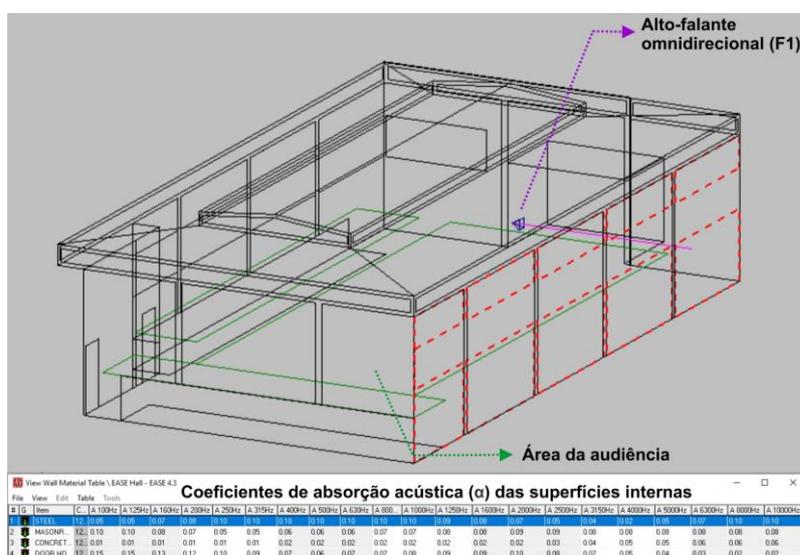
**Figura 41:** 3D do objeto de estudo – Sketchup e EASE 4.3, respectivamente.



Fonte: O Autor (2017).

A partir daí, foi simulada a primeira situação da medição *in situ* da fase 1: inserção de dados referentes ao posicionamento do alto-falante que gerará o ruído na sala (fonte omnidirecional), a área de audiência (receptor, que também podem ser representados por pontos específicos) e materiais acústicos das superfícies internas.

**Figura 42:** Objeto de estudo modelado pronto para simulação de F1 (fase 1).

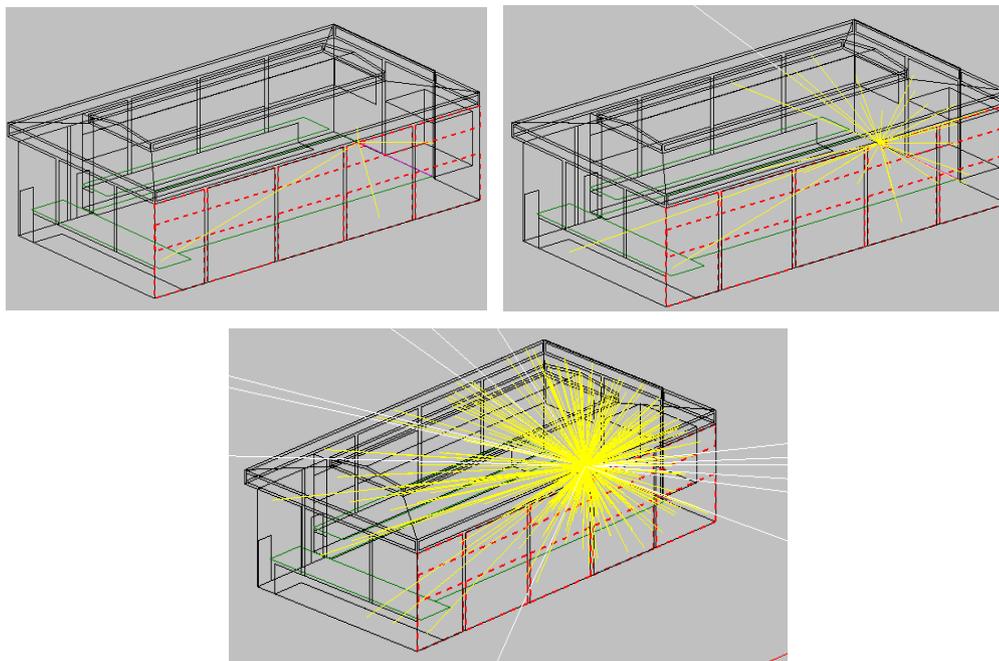


Fonte: O Autor (2017).

Um dos estudos que podem ser feitos com o modelo 3D é o comportamento da emissão sonora a partir da fonte utilizando o método do raio traçado, representados

em amarelo e branco na figura 43. As cores indicam que o raio sonoro virtual está sendo emitido sem perda de energia.

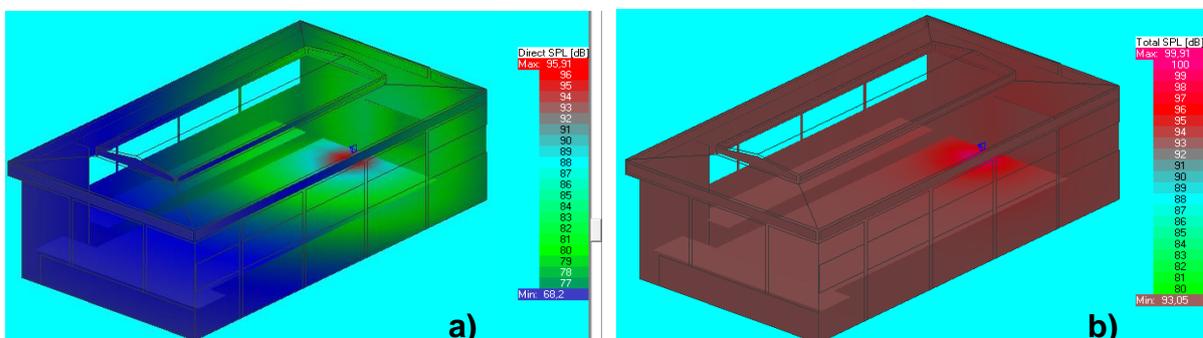
**Figura 43:** Aplicação do método do raio traçado no modelo 3D.



Fonte: O Autor (2017).

O EASE 4.3 permite “separar” o campo direto do campo difuso através desse método (o que é fisicamente impossível em ambientes naturais) e assim é possível analisar o  $L_{eq}$  (com ou sem filtro de ponderação A) ao longo da área e das superfícies internas do objeto de estudo em ambas as situações.

**Figura 44:** Mapeamento sonoro do campo direto isolado (a) e do campo direto + difuso (b).



Fonte: O Autor (2017).

Essa simulação mostra que a diminuição do campo difuso possibilita uma diminuição do nível de pressão sonora global dentro da edificação. Para isso, deve-se levar em consideração o fato de que a situação apresentada na primeira imagem (“a” da figura 44) é fictícia e possível de existir unicamente em laboratório.

No mais, há um limite de absorção a ser respeitado para atingir o tempo ótimo de reverberação no ginásio para que o som reproduzido internamente não seja absorvedor demais a ponto de soar “morto” (VALLE, 2006). Em função disso, este programa irá simular aplicações de uma determinada quantidade de materiais acústicos em posições pré-determinadas e os resultados serão discutidos a partir da seção 5.3. Como resultado prático, o EASE 4.3 permitirá ouvir o som dentro do ambiente por meio de sua ferramenta de auralização, podendo comparar o som gerado dentro do recinto antes e após a aplicação dos painéis absorvedores.

### **3.5.2. Simulação da emissão sonora dentro do objeto de estudo / investigação externa: utilização do *software* Noise 3D.**

O *software* Noise 3D, desenvolvido pela companhia alemã Informatik GmbH, utiliza todas as funcionalidades do Sketchup Pro (no formato de *plugin*) para a criação de mapas acústicos urbanos baseados nos preceitos da norma ISO 9613-2, que estabelece relações matemáticas de propagação e atenuação sonora em ambientes abertos (ISO, 1996). Nesta plataforma, é possível ilustrar o comportamento sonoro de edificações ruidosas (como casas de shows, fábricas, casas de máquinas, etc.) no contexto urbano, considerando diversas fontes de ruído atuando simultaneamente, como tráfego de veículos, e atenuadores, como prédios e folhagens, que oferecem obstáculos à livre propagação do som.

Nesta etapa serão referenciados os procedimentos para o registro de toda a etapa 04 com a simulação da emissão sonora dentro do objeto de estudo para investigação do impacto externo. O ginásio poliesportivo da escola A é inserido no contexto como uma fonte de ruído e sua influência é avaliada na vizinhança em que está inserido. O objetivo desse *software* na metodologia é ilustrar três cenários:

- O ruído do entorno com o ginásio sem atividades;
- O ruído do entorno com o ginásio em funcionamento sem redução de ruído por absorção – mostrado na seção 4.6;
- O ruído do entorno com o ginásio em funcionamento com a implantação dos painéis absorvedores para redução de ruído por absorção – apresentado no capítulo 4.

### a) Procedimentos de montagem do cenário para simulação

A primeira etapa foi selecionar a área onde o objeto de estudo está inserido. Para isso, foi usada a ferramenta de geolocalização do Sketchup Pro oferecida pelo *Google maps* (figura 45).

**Figura 45:** Parcela do entorno do objeto de estudo.



Fonte: O Autor (2018).

Em seguida, com base no *Google maps* (figura 46), foi possível supor a altura das edificações que compõem o entorno do ginásio para montar o mapa de análise.

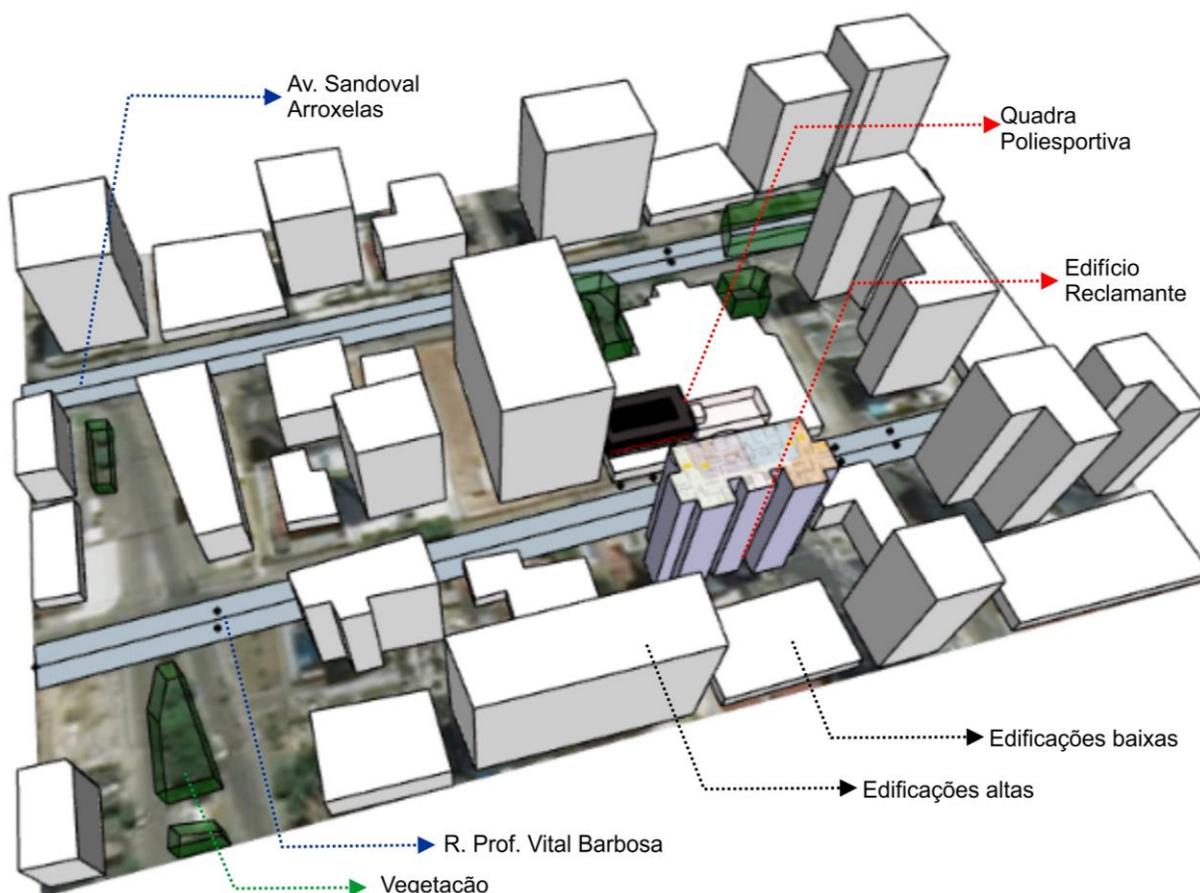
**Figura 46:** Parcela do entorno do objeto de estudo.



Fonte: adaptado de GoogleMaps (2018).

Um fator que merece destaque é a precisão das medidas nos mapas. Dessa forma, as dimensões encontradas no levantamento arquitetônico corresponderam à realidade (figura 47).

**Figura 47:** Modelo 3D para mapeamento sonoro feito a partir de ferramenta de geolocalização.



Fonte: O Autor (2018).

### **b) Procedimento de inclusão de dados das vias e das edificações**

Uma vez que o modelo virtual é montado, são inseridos os dados (fig. 48):

- Fonte de ruído (abertura do ginásio poliesportivo voltada à R. Prof. Vital Barbosa);
- Posicionamento dos receptores (P1, P2, P3 – Figura 48);
- RL (*Reflection Loss* – perda de ruído em função reflexão) das fachadas das edificações altas e baixas (usou-se o valor constante = 1 dB de perda);
- Ruído das vias.

Para a aplicação das informações sobre ruído existente nas vias do modelo em questão, utilizou-se a base de dados fornecidos pelo Grupo de Estudos do Ambiente Sonoro (GEAS) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). Os dados foram parte dos resultados parciais do projeto de iniciação científica com alunos da graduação liderados pela prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Lúcia Oiticica, com o objetivo de criar o mapeamento de ruído da cidade de Maceió–AL.

Os procedimentos de medição acústica desenvolvidos pelo GEAS receberam o auxílio técnico dos alunos do mestrado do programa de pós-graduação DEHA (Dinâmicas do Espaço Habitado) com trabalhos orientados pela professora, contribuindo para a troca de experiências entre os componentes. A Tabela 13, a seguir, apresenta os dados de NPS encontrados na Av. Sandoval Arroxelas e na R. Prof. Vital Barbosa. Diante das especificações da NBR 10.151 (ABNT, 2000), a primeira é uma área mista, com vocação comercial e administrativa – NCA 60 dB(A); e a segunda é área mista, predominantemente residencial – NCA 55 dB (A).

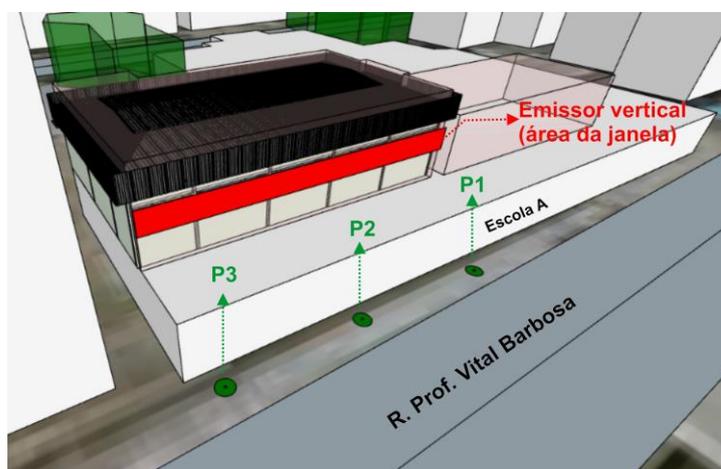
**Tabela 13:** Levantamento das vias do entorno do objeto de estudo.

Endereço	QUANTIDADE / PORCENTAGEM							LAeq dB(A)	LAeq Recomend. NBR 10.151 dB(A)
	Ônibus/ Caminhões		Carros		Motos		Total		
	Nº	(%)	Nº	(%)	N	(%)	Nº		
R. Prof. Sandoval Arroxelas	20	11,25	139	87,4	-	0	159	78	60
Prof. Vital Barbosa	2	15,38	11	84,6	-	0	13	56	55

Fonte: O Autor (2017).

O posicionamento dos receptores e os valores de emissão sonora reproduziram os procedimentos e os resultados da fase 2 da etapa 04 da metodologia.

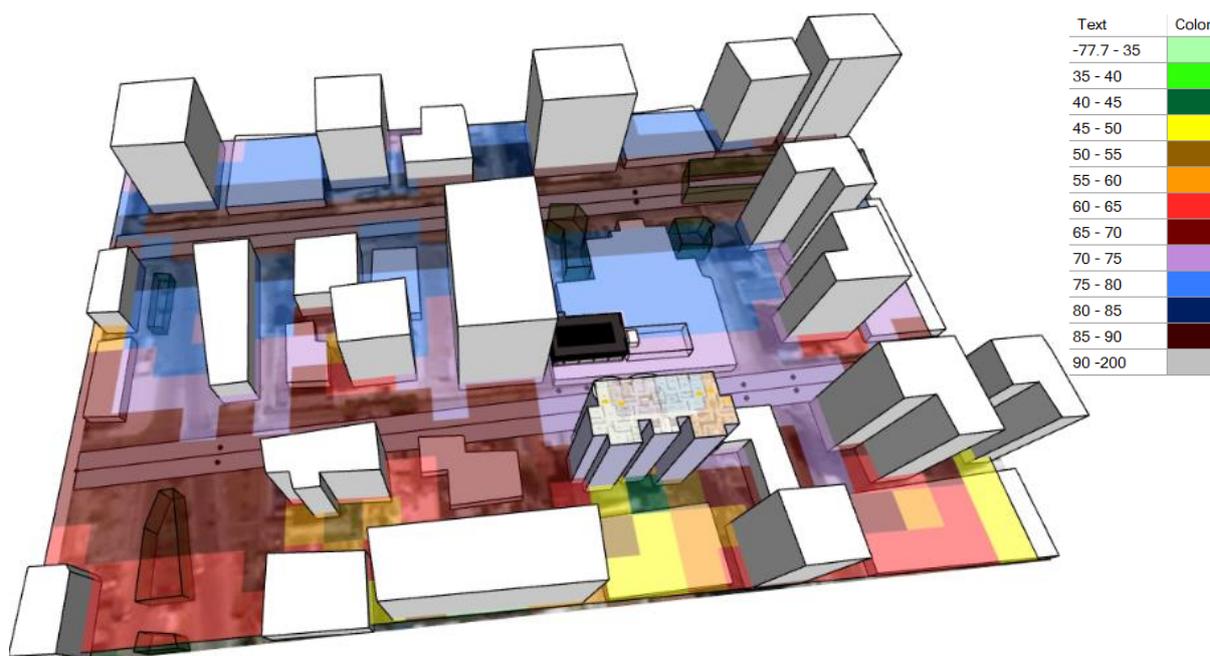
**Figura 48:** Fonte e receptores – Etapa 02 das medições *in situ*.



Fonte: O Autor (2018).

O mapa de ruído gerado no *software* Noise 3D (Figura 49) corresponde aos dados colhidos pela manhã. A legenda mostra a influência do ruído das vias, principalmente dos altos índices registrados na Av. Sandoval Arroxelas, com valores que ultrapassam 85 dB pelas manhãs.

**Figura 49:** Mapa de ruído do entorno do objeto de estudo SEM ATIVIDADES.



Fonte: O Autor (2018).

No entanto, com o ginásio sem realização de atividades, os valores de emissão na abertura do ginásio poliesportivo não foi considerado (0 dB de emissão). Por outro lado, o mapa de ruído (figura 49) apresenta valores entre 70- 75 dB na área que rodeia o objeto de estudo. É importante, então, lembrar dos valores de ruído residual dentro do objeto de estudo: 56dB e 54dB. Uma diferença de 15dB entre o ruído fora e dentro de um ambiente dotado de paredes de alvenaria torna o modelo simulado coerente com o que ocorre em situação real.

### 3.6. Observações principais do capítulo

O capítulo inicia com a apresentação dos critérios de seleção do objeto de estudo, o ginásio poliesportivo da escola A. Após levantamento arquitetônico e cálculos acústicos estatísticos, criou-se uma maquete eletrônica do objeto de estudo submetido à análise no *software* de simulação acústica EASE 4.3.

Em paralelo, medições de resposta ao impulso de Nível de Ruído Equivalente ( $L_{eq}$ ) médio e Tempo de Reverberação (T30) e diferença de nível (D), foram realizadas à luz das normas NBR 10.151 (ABNT,2000), ISO 3382-2 (ISO,2008), ISO 16032 (ISO,2004), ISO 16283-1 (ISO, 2014) e ISO 18233 (ISO,2006). Os dados das

medições acústicas também serviram de base para a confecção dos mapas de ruído no *software* Noise3D com e sem o impacto sonoro gerado pelo objeto de estudo.

No que se refere às diferenças entre os métodos de medição *in situ*, tem-se conhecimento que o processo de medição por resposta integrada ao impulso por sinal acústico *sweep* permite que durante a emissão da onda em uma determinada frequência, o *software* (*Room Eq Wizard*, no caso) processe a captação apenas da faixa de frequência que está sendo emitida, excluindo-se interferências externas que causem soma de *decibels* no resultado final.

Por este motivo, a ISO 18233:2006 (ISO,2006) recomenda o método também para medição de transmissão sonora entre partições e, por essa recomendação é que se fez o teste entre os métodos. Os dados obtidos nas medições acústicas são concretos e a simulação, como o próprio nome diz, apresentou dados aproximados, o que validou o procedimento a ser realizado no capítulo seguinte: de análise dos painéis acústicos. A simulação acústica permite alterar as características da sala e fornecer vários resultados para comparação com confiabilidade para este caso específico.

É importante deixar claro que os métodos de medição são diferentes dos métodos de simulação. De qualquer forma, os parâmetros buscados são os mesmos nos dois procedimentos e quando os valores entre medições e simulações também são correspondentes, valida-se o seu uso para testes mais aprofundados, como foi possível ver tanto na obtenção do  $L_{eq}$  global na fase 1 da etapa 04 da metodologia, quanto no mapa de ruído gerado com os dados obtidos nas medições da fase 2 da mesma etapa.

Também vale ressaltar que nenhum equipamento de preço acessível é capaz de fornecer dados seguros o suficiente para desenvolver laudos técnicos seguros. Todas as normas nacionais e internacionais afirmam ser fundamental que os equipamentos de aferição passem por procedimentos de calibração para a validação dos dados obtidos de fato. O capítulo a seguir traz análises e diagnósticos a respeito de todas as informações apresentadas, cruzando dados dos variados procedimentos descritos nas etapas metodológicas, apresentando novos cálculos, juntamente com as estratégias de redução de ruído por absorção através da Acústica Geométrica.

## 4. ANÁLISE E DIAGNÓSTICO

Conhecer o entorno é fundamental para a implantação adequada de qualquer construção. “Se de um lado a edificação é marcada por aberturas livres as quais permitem um condicionamento natural de excelentes resultados energeticamente, por outro, têm-se janelas voltadas para espaços públicos acusticamente agradáveis ou não” (OITICICA, 2010). Alinhar o desempenho energético de uma edificação a níveis satisfatórios de conforto ambiental tem sido uma tarefa desafiadora para projetistas.

Um desses desafios é aliar o desempenho acústico ao desempenho térmico de uma edificação, afinal, como é possível garantir a ventilação cruzada e o isolamento acústico de uma quadra poliesportiva sem isolar suas aberturas? O estudo de repertório presente no capítulo 2 mostrou que ginásios de esportes de diversos tamanhos são ambientes ruidosos e que a ventilação cruzada torna-se importante para a renovação de ar dentro desses locais, principalmente no Brasil.

Uma das tarefas do projetista passa a ser o conhecimento técnico agregado à criatividade para sanar as adversidades ainda na fase de projeto, adequando-o às condições adequadas de conforto ambiental. Entretanto, no caso do objeto de estudo, a situação é diferente por estar estabelecido o conflito em função do ruído gerado por uma quadra poliesportiva já existente que incomoda a circunvizinhança. Diante disso, as medidas corretivas são buscadas somente quando a relação entre reclamantes e reclamados encontra-se desgastada. Soma-se o fato de que o ônus financeiro para intervenção em acústica é muito maior que na fase de planejamento de uma obra.

Nepomuceno (1968) contabiliza o custo do tratamento acústico de uma edificação e afirma que ainda na fase de projeto, o investimento varia entre 0,5% e 2% do custo total da obra, uma vez que em uma construção já pronta, o tratamento acústico realizado como medida corretiva tem seu custo estimado em mais de 10% do custo total da obra para atingir um resultado igual ou inferior ao tratamento proposto em projeto antes de sua execução.

Uma vez que as técnicas de predição do comportamento sonoro no ginásio escolhido como objeto de estudo foram validadas, os resultados serão apresentados com o intuito de estudar a influência de superfícies sonoabsorventes implantadas para a redução do ruído global gerado dentro do ginásio de atividades multifuncionais.

#### 4.1. Etapa 06 – Análise de dados para validação da simulação

Após a exploração de cálculos, métodos de medição, instrumentos de medição sonora de custos e tipos diferentes para a obtenção dos mesmos dados, e a importação de uma série de normas cujos métodos foram adaptados à situação do objeto de estudo analisado, esta etapa consistiu em cruzar e interpretar todas as informações obtidas para validar, ou não, os dados da simulação computacional do *software* EASE 4.3.

Esse programa é uma importante ferramenta, pois é o único *software* (dentre os disponíveis nesta pesquisa) capaz de simular a aplicação dos painéis absorvedores no ambiente investigado para a avaliação da redução de ruído por absorção. Uma vez que esse *software* simulou a obtenção de TR e Leq global na fase 1 da etapa 04 da metodologia, cabe agora comparar se os valores se aproximam a ponto de garantir, ao menos, uma relação comparativa aproximada entre o objeto de estudo antes e depois da aplicação dos painéis acústicos.

##### 4.1.1. Tempo de Reverberação

O primeiro parâmetro levantado na fase 1 da etapa 04 da metodologia foi o tempo de reverberação do ambiente em sua configuração atual (sem tratamento acústico). Os valores obtidos em cálculo através da equação de TR de Sabine (Acústica Estatística), medições com o método de resposta integrada ao impulso através de sinal *sweep* determinado na norma ISO 3382-2:2008 (medições *in situ*), e simulações através do *software* de simulação acústica, baseado no método do raio traçado, EASE 4.3 (Acústica Geométrica), estão elencados na Tabela 14, a seguir.

**Tabela 14:** Tempo de reverberação calculado, medido e simulado.

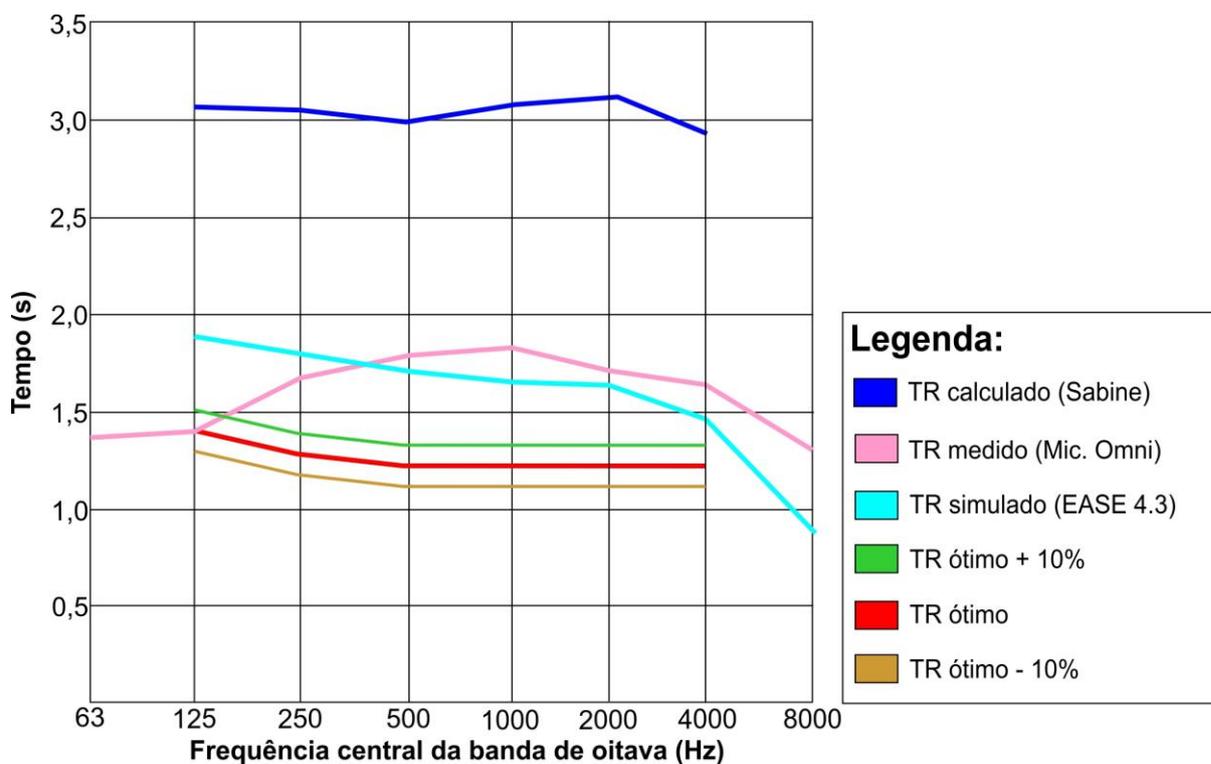
TEMPO DE REVERBERAÇÃO								
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>Cálculo</b>	--	<b>3,07 s</b>	<b>3,05 s</b>	<b>2,99 s</b>	<b>3,07 s</b>	<b>3,12 s</b>	<b>2,91 s</b>	--
<b>Medição</b>	<b>1,358s</b>	<b>1,39 s</b>	<b>1,66 s</b>	<b>1,78 s</b>	<b>1,83 s</b>	<b>1,74 s</b>	<b>1,63 s</b>	<b>1,29 s</b>
<b>Simulação</b>	--	<b>1,89 s</b>	<b>1,79 s</b>	<b>1,72 s</b>	<b>1,65 s</b>	<b>1,64 s</b>	<b>1,45 s</b>	<b>0,87 s</b>
<b>IDEAL</b>	--	<b>1,56 s</b>	<b>1,38 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>

Fonte: O Autor (2018).

Na Tabela 14 e no gráfico 2, percebe-se a importância do cálculo de TR para um primeiro diagnóstico das características acústicas de uma sala e para o norteamento de estratégias de controle acústico.

Porém, ao realizar as medições no local do objeto de estudo, os valores caíram, provavelmente em função da geometria do espaço, que é ignorada no cálculo acústico estatístico.

**Gráfico 2:** TRs ótimo, calculado, medido e simulado.



Fonte: O Autor (2018).

Por outro lado, satisfatoriamente, os valores obtidos na simulação acústica com o EASE 4.3 apresentaram resultados relativamente próximos, trazendo confiabilidade, para os valores de TR, entre dados medidos e simulados.

O distanciamento dos valores medido e simulado deve-se a características da fonte sonora e microfones usados na medição, bem como na configuração da fonte sonora do modelo simulado, pois a fonte sonora do modelo simulado emite, de forma equilibrada e uniforme, a mesma energia sonora para todas as frequências, o que não ocorre com a fonte omnidirecional convencional, por ser mais fraca na emissão de frequências abaixo de 200Hz.

#### 4.1.2. Leq global interno

A fase 1 da etapa 04 da metodologia também levantou o nível de pressão sonora equivalente ( $L_{eq}$ ) nos mesmos 12 pontos em que foram levantados os tempos de reverberação utilizando diferentes sinais acústicos, diferentes medidores de pressão sonora e simulação acústica com o EASE 4.3. Na Tabela 15, seguem os valores, em dB, por ser uma avaliação de energia acústica global em bandas de oitava, com todas as nomenclaturas já apresentadas e descritas na seção 3.4.2 f).

**Tabela 15:** Valores de  $L_{eq}$  por frequência e global, medidos e simulados.

Leq (dB)	Frequência (Hz)											Leq global (dB)
	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
<b>MRBs</b>	63,7	65,5	69,8	68,2	73,5	84,3	87,4	84,6	84,2	82,6	69,0	<b>92,1</b>
<b>MRBmo</b>	64	67,8	70,1	71,8	77,4	89,6	90,4	89,9	88,4	86,7	78,4	<b>96,3</b>
<b>MSS</b>	50,5	56,7	65,7	75,9	73,1	87,3	88,8	85,8	82,9	79,5	61,9	<b>93,1</b>
<b>Simulação</b>	0	0	0	93,7	93,4	93,2	92,8	93,1	92,4	89,7	0	<b>101,2</b>

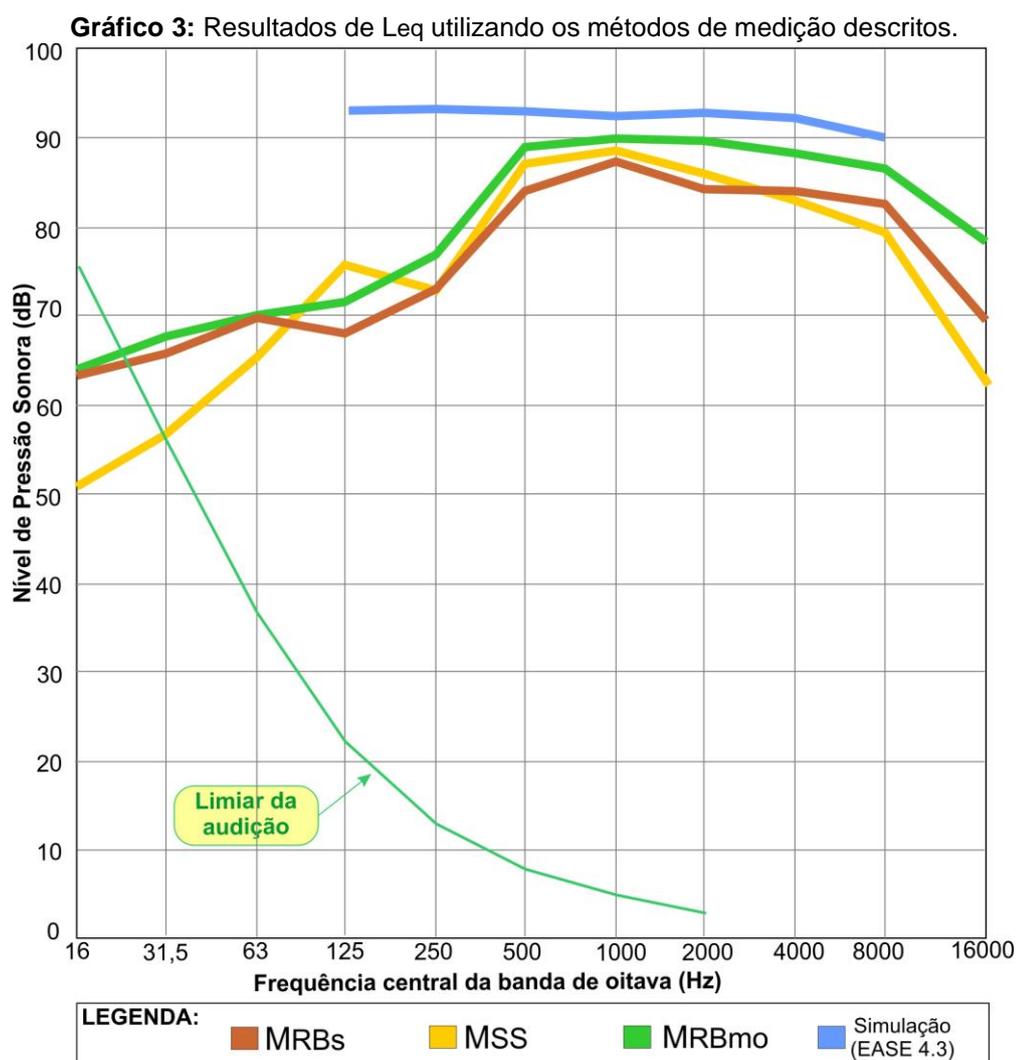
Fonte: O Autor (2018).

As médias dos  $L_{eq}$ 's, por frequência, foram obtidas seguindo as diretrizes da NBR 10.151:2000: "Os níveis de pressão sonora em interiores devem ser o resultado da média aritmética dos valores medidos em pelo menos três posições distintas, sempre que possível afastadas entre si em pelo menos 0,5 m" (ABNT, 2000).

Dessa forma, obtiveram-se os níveis globais de pressão sonora apresentados no final da referida tabela. Os valores obtidos divergem. A margem de divergência entre a média global mais baixa (medição – ruído branco – sonômetro) e mais alta (simulação) é 9,1 dB. Por outro lado, a diferença se dá entre uma medição e uma simulação. A divergência entre valores globais medidos é menor, na ordem de 4,2 dB,

mostrando que o uso de equipamentos de custo acessível permitem a obtenção de dados confiáveis, possibilitando a interpretação dos mesmos para a resolução de questões de acústica em ambientes construídos.

O gráfico 3 apresenta a proximidade dos dados obtidos referentes a valores de NPS em dB. A diferença encontrada nos valores entre as frequências pode ser interpretada de diversas formas: desde deficiências técnicas do microfone omnidirecional (por não ser enquadrado tanto na Classe 1, quanto na Classe 2), como também a capacidade de emissão homogênea em todas as frequências da fonte dodecaédrica na aplicação tanto do ruído branco, quanto do sinal *sweep*.



Fonte: O Autor (2018).

Entretanto, para todos os efeitos, as medições em métodos distintos continuam a apresentar dados consistentes e correspondentes. No que se refere à simulação, a maior divergência se dá a partir de 250Hz, pois, dentro do *software*, na área de

configuração de emissão da fonte sonora omnidirecional, os valores de emissão são categoricamente idênticos: 95 dB de 100Hz a 10000Hz, o que não acontece com uma fonte dodecaédrica, principalmente por não ser usada com *subwoofer* para permitir um melhor espalhamento das frequências baixas no objeto de estudo.

#### 4.1.3. Diferença de NPS (D) – Leq interno e externo

Os diversos valores de D obtidos através de estratégias variadas de medição e através de simulação estão apresentados na Tabela 16. As nomenclaturas estão descritas na seção 3.4.3 e).

**Tabela 16:** Valores de Leq global medido e simulado – Fase 2 / Etapa 04.

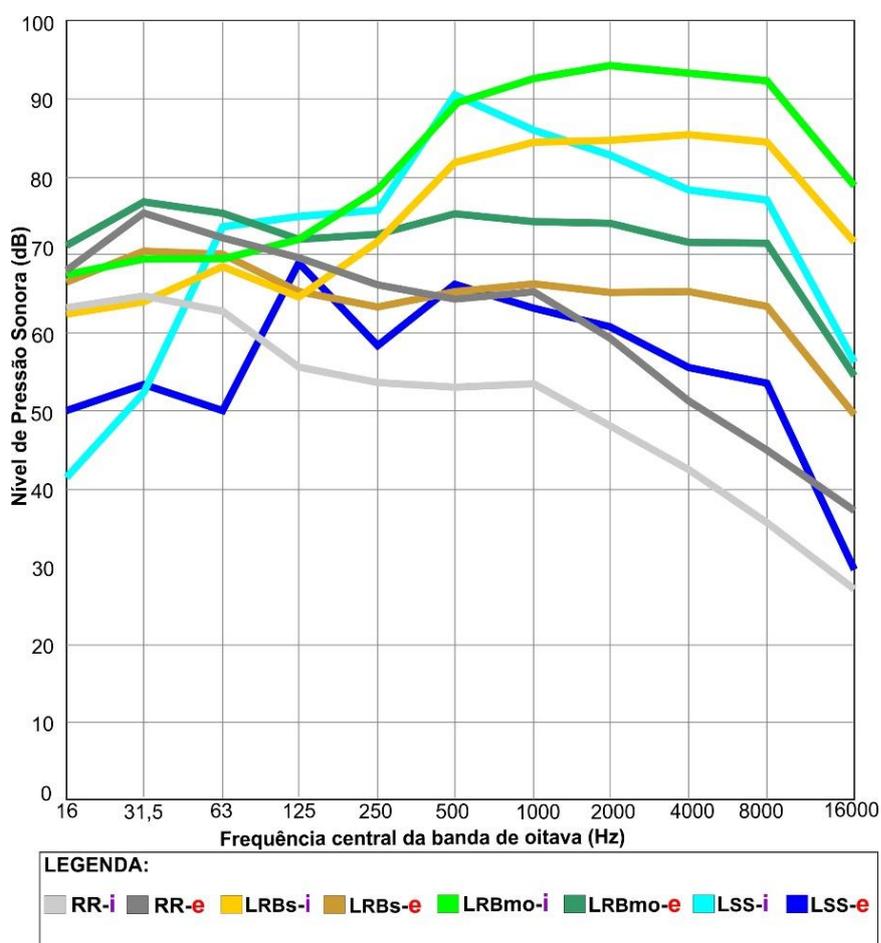
Leq (dB)	Frequências (Hz)											Leq (dB) Global	Diferença de nível (D)
	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k		
RR-i	62,7	64,3	62,7	55,5	53,7	53	53,5	47,4	41,8	35,1	26,4	68,8	9,9dB
RR-e	67	75,2	72	69,4	65,9	64,3	65,5	58,7	50,4	44,2	37,1	78,7	
Contabilidade média de veículos no levantamento: 3 carros e 1 moto / ponto													
LRBs-i	62,4	63,8	68,6	64,3	71,9	81,9	84,7	84,4	85,3	84,4	71,2	91,4	14,8dB
LRBs-e	66,1	70,2	69,8	65,5	63,4	65,3	66,2	65,1	65,3	63,2	49,2	76,6	
Cont. média de veículos no levantamento: 3,8 carros e 1,4 moto / ponto													
LRBmo-i	66,7	69,6	69,3	71,9	78,5	89,6	92,6	94,1	93,1	92,1	78,4	99,6	15,9dB
LRBmo-e	70,8	76,7	75	71,9	72,2	75,3	74,1	74,2	71,6	71,2	54,2	83,7	
Cont. média de veículos no levantamento: 3,8 carros e 1,4 moto / ponto													
LSS-i	40,6	52,1	73,5	74,8	75,8	90,3	85,3	82,4	78	76,7	55,9	92,5	20,3dB
LSS-e	49,7	53,1	50	68,9	58,5	65,9	63,2	60,7	55,3	53,1	29,7	72,2	
Cont. média de veículos no levantamento: 2,6 carros e 1 moto / ponto													

Fonte: O Autor (2018).

Para entender o que se passa na fase 2 da etapa 04 da metodologia (seção 3.4.3), percebe-se a importância em traduzir e interpretar os valores separadamente, pois de todas as 18 medições realizadas em cada um dos 3 métodos pesquisados, 9 delas ocorreram dentro do objeto de estudo e 9 ocorreram fora dele, assim, torna-se possível uma interpretação mais organizada da diferença de nível no interior e no exterior do ginásio poliesportivo e a análise dos valores obtidos nos diferentes procedimentos.

Ao reunir todos os valores em um gráfico comparativo, o resultado é o que se vê no gráfico 4, abaixo.

**Gráfico 4:** Leq obtido em todos os métodos de medições da Fase 2 / Etapa 04.



Fonte: O Autor (2018).

### a) Medições no exterior do objeto de estudo

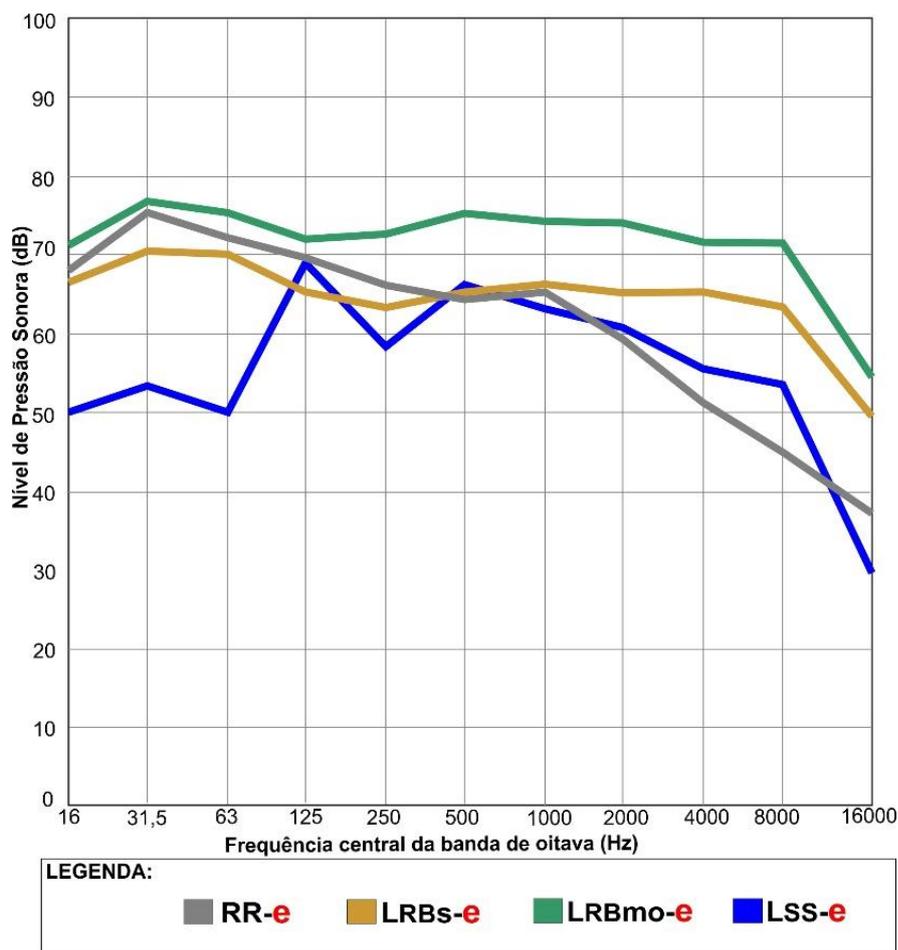
A primeira observação que merece destaque é o Leq do ruído residual obtido tanto nesta medição, quanto na medição ocorrida com um sonômetro Classe 2 no

capítulo 3: 78,7 dB e 78,1 dB, respectivamente. Também vale resgatar o mapeamento sonoro apresentado na seção 3.5.2.2 que, na cor lilás, mostra a rua Professor Vital Barbosa dentro da margem e 70 a 75 dB o que mostra que, mesmo em dias distintos, o ruído residual da rua mencionada é constante.

Os valores globais entre os métodos de medição no exterior do objeto de estudo revelaram uma diferença de 11,5 dB entre a medição por ruído branco captada pelo microfone omnidirecional e a medição por resposta integrada ao impulso por sinal *sweep*.

A linha correspondente ao ruído residual (em cinza escuro) invade área das medições de ruído branco com os valores elevados nas frequências baixas, provavelmente por conta do registro da passagem de veículos nas medições, como mostra a média da contabilidade de veículos por ponto medido na Tabela 16, já apresentada.

**Gráfico 5:** Leq obtido em 3 métodos de medições no exterior do ginásio.



Fonte: O Autor (2018).

Os valores globais encontrados nos procedimentos de medição de resposta integrada ao impulso por sinal *sweep* e no procedimento convencional com ruído branco captado por sonômetro, mantém a perspectiva animadora que o uso do método com equipamentos acessíveis são capazes de trazer, com diferença de  $L_{eq}$  global de 4,4 dB.

Muito embora, ao observar os valores por frequência, constatam-se NPS muito baixos, se comparados os valores da edição com sinal *sweep* aos valores obtidos através de ruído branco. Por outro lado, como a medição ocorreu no exterior do ginásio poliesportivo, diversos fatores externos são levados em consideração, inclusive o maior número de carros e motos registrados nos períodos dessas medições, principalmente as que utilizaram o método do ruído branco.

É possível afirmar, então, que a precisão das medições por ruído branco no exterior do recinto analisado tenham sofrido forte influência da passagem de veículos, uma vez que a velocidade do vento era baixa e não tinha condições de modificar os valores obtidos. De qualquer modo, os valores obtidos por frequência da medição por ruído branco utilizando o microfone omnidirecional e o RTA (*Real Time Analyser* – analisador em tempo real) do *software Room EQ Wizard* não trouxeram dados tão próximos quanto o que se esperava, mesmo que o comportamento da linha no gráfico 5 seja parecido.

Essa constatação pode ser considerada conclusiva, pois mesmo diante de diversas variáveis externas, as medições foram realizadas no mesmo momento com os medidores diferentes: sonômetro e microfone omnidirecional. No que se refere aos valores encontrados por frequência, a discrepância é na ordem de 4 dB a 8 dB, não trazendo confiabilidade plena ao método de medição convencional por ruído branco com equipamentos economicamente acessíveis.

## **b) Medições no interior do objeto de estudo**

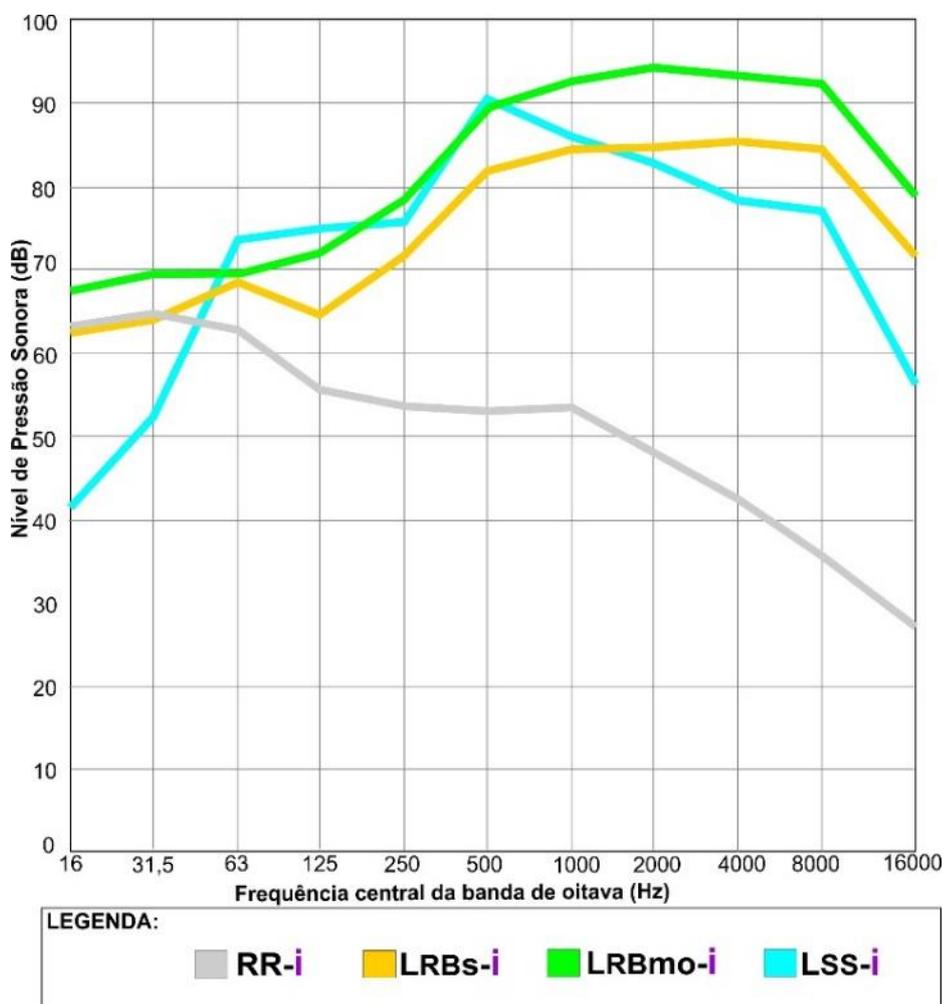
As medições realizadas no interior do objeto de estudo contribuíram para elucidar a questão da diferença entre os valores obtidos nas medições de resposta integrada ao impulso e o método convencional. A diferença entre os valores globais das duas medições foi de apenas 1,1 dB. Dessa forma, pode-se afirmar que a

passagem de veículos impediu a acurácia da medição de Leq por ruído branco, causando maior discrepância entre os valores em questão.

Observa-se, no gráfico 6 a seguir, que o comportamento das linhas nas medições convencionais com ruído branco utilizando sonômetro e microfone omnidirecional são semelhantes, contudo, ao consultar a Tabela 16, a diferença entre os valores, por frequência, varia de 4 dB a 10 dB, refletindo-se na diferença de 7,1 dB entre os valores globais obtidos nesse mesmo tipo de método.

A diferença entre os valores por frequência também ocorre no caso da medição com sinal *sweep* e a medição convencional com ruído branco e sonômetro Classe 1. Entretanto, salvo um pico em 500 Hz que gerou uma diferença de 9 dB, o restante das frequências entre 250 Hz e 8 kHz tiveram uma margem de 4 dB a 6 dB, o que aproximou os valores globais desses diferentes métodos.

**Gráfico 6:** Leq obtido em 3 métodos de medições no interior do ginásio.



Fonte: O Autor (2018).

Outra informação que merece atenção é o ruído residual captado dentro do ginásio poliesportivo. Pode-se afirmar que todo o sistema construtivo do recinto, mesmo com as grandes aberturas, impede que 9 dB a 11 dB da rua entrem no local. Por outro lado, pode-se suspeitar que a aplicação de painéis absorvedores acústicos, beneficiariam não só o ruído que evade o ginásio, mas também contribuiria para diminuir as reflexões sonoras do ruído que entra no objeto de estudo.

#### **4.1.4. Representação em mapa de ruído urbano**

Um dos resultados práticos das medições é a possibilidade de alimentar *softwares* de mapeamento sonoro com as informações obtidas em todos os procedimentos descritos na metodologia do trabalho.

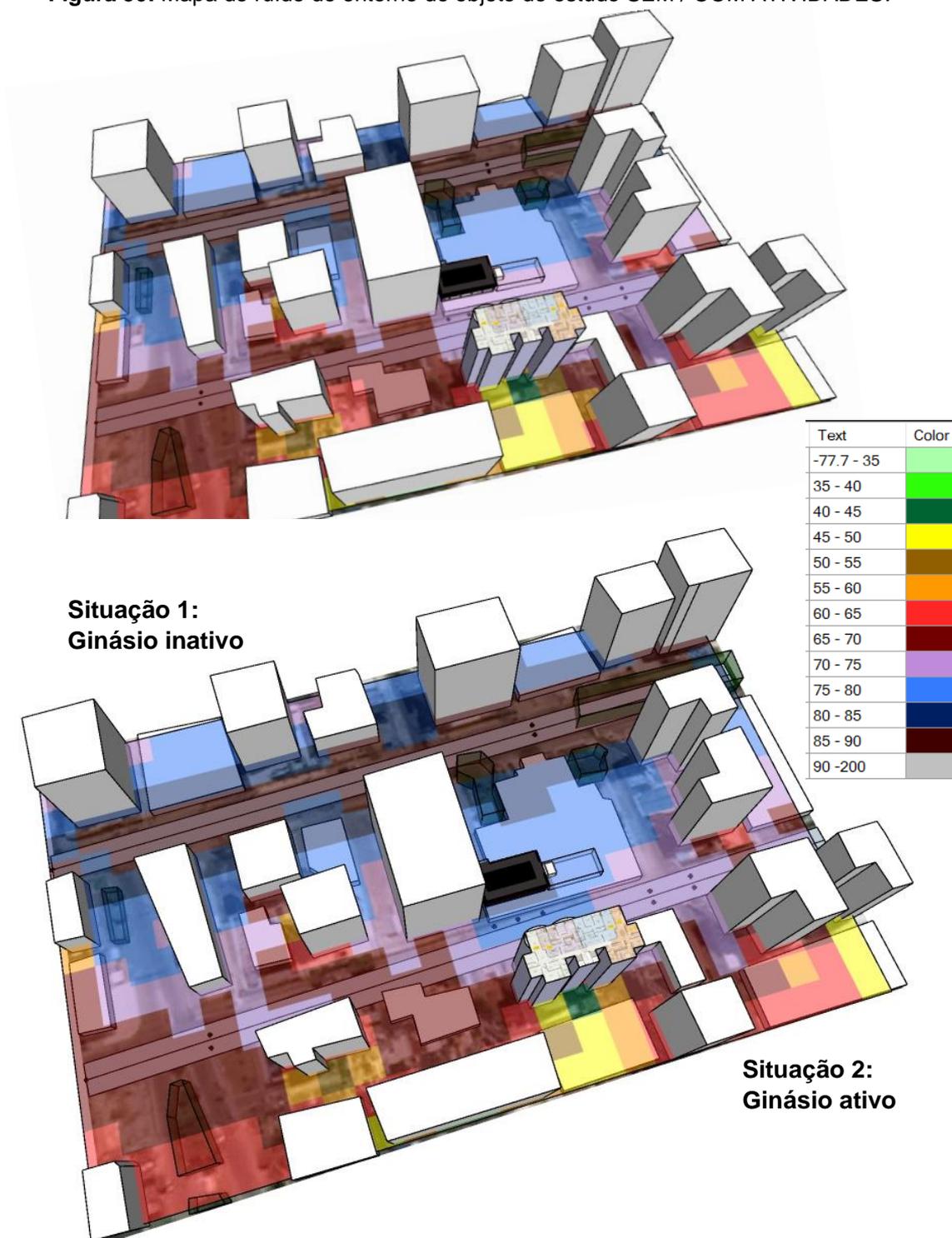
O programa Noise 3D, na etapa 05, já apresentou os dados referentes ao objeto de estudo sem funcionamento, onde os valores de ruído residual foram correspondentes aos dados simulados, como é possível ver no comportamento dos gráficos, salvaguardadas as proporções no que se refere às questões físicas de um ambiente real em relação a um ambiente simulado.

Dessa vez, com base na figura 49 (p.79, apresentada na seção 3.5.2.b), os dados de emissão sonora foram inseridos e todo o complexo do entorno do ginásio poliesportivo analisado foi calculado com os condicionantes levantados, desde as condições meteorológicas, a absorção do som pela atmosfera, as divergências geométricas em função das formas dos edifícios, barreiras, reflexões (ISO,1996), até os dados levantados das vias que compõem a vizinhança.

A figura 50 ilustra, nitidamente, a perturbação no mapa sonoro que justifica o incômodo gerado pelo objeto de estudo e sua propagação diretamente para o Edifício Reclamante.

Vale ressaltar que os valores obtidos no mapeamento de ruído com o *software Noise 3D* apresentam proximidade com os valores nas medições no exterior do objeto de estudo, principalmente as aferições com ruído branco para ambos os equipamentos de medição utilizados (nomenclatura com sigla “RB-e”).

**Figura 50:** Mapa de ruído do entorno do objeto de estudo SEM / COM ATIVIDADES.



Fonte: O Autor (2018).

## 4.2. Parâmetros acústicos estatísticos

O cálculo acústico estatístico auxilia o projetista na primeira tomada de decisões a respeito da situação em que o objeto de estudo se encontra, e do tipo de

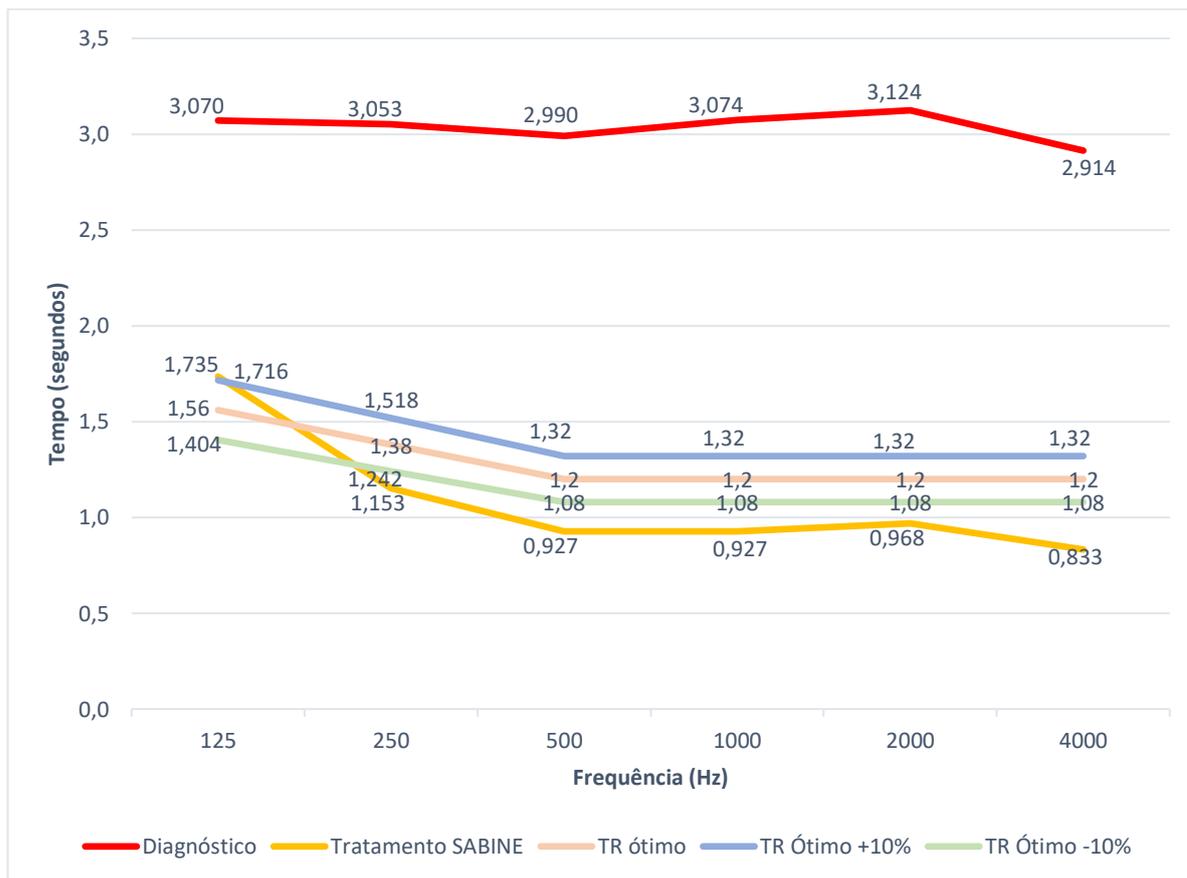
material necessário para condicionar adequadamente o recinto aos requisitos dos parâmetros acústicos analisados definidos em normas.

#### 4.2.1. Tempo de Reverberação (TR) – Proposta definida em cálculo

Para alcançar o TR ótimo, optou-se por trabalhar um material simples, de baixo custo e com NRC fixo de 0,74. A lã de vidro de 50mm de espessura envolta em material de alta transparência acústica (tecido ortofônico) é um material que se adequa a essas características. Para atingir o TR ótimo de 1,2 segundos em 500Hz é necessária a aplicação de, aproximadamente, 200m<sup>2</sup> desse material montado sobre as superfícies internas do objeto de estudo mediante aplicação da equação de Sabine.

O gráfico 7 mostra o comportamento da quadra antes da aplicação (diagnóstico – linha vermelha) e após o condicionamento proposto (tratamento eq. SABINE – linha amarela), apresentando, também, o TR ótimo com as margens de 10% acima e abaixo do valor determinado.

**Gráfico 7:** TR antes e depois da aplicação de painéis com lã de vidro.



Fonte: O Autor (2017).

#### 4.2.2. Redução de ruído por absorção – Proposta definida em cálculo

De acordo com a absorção total (A) proposta para o objeto de estudo, foi possível desenvolver o cálculo de redução de ruído por absorção sob os métodos de Egan (2000) e Gerges (1992). O cálculo da fórmula de Egan (2000) está descrito na figura 51. A absorção total (A) na situação original considera as aberturas da edificação como absorvedores de ruído, não como flancos emissores do mesmo. Dessa forma, a fragilidade do cálculo para situações específicas traduz a necessidade de um aprofundamento maior com outros métodos de cálculo e simulações.

**Figura 51:** Expectativa de redução de ruído (RR) de acordo com a fórmula de Egan (2000).

$$\begin{aligned}
 & \text{(EGAN,2000)} \\
 & A_{\text{situação original}} = 409 \text{ Sabines} \\
 & A_{\text{Após 200m}^2 \text{ de material acústico}} = 1208 \text{ Sabines} \\
 & RR = 10 \log \frac{A_{\text{Situação original}}}{A_{\text{Após 200m}^2 \text{ material acústico}}} \\
 & = 10 \log \frac{409}{1208} \\
 & = 10 \log 0,334 = -4,76 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Fonte: O Autor (2018).

Considerando os dados apresentados nos levantamentos no capítulo 3, a distância entre a fonte de ruído (o centro da quadra poliesportiva) e a janela da quadra é de 4,5 metros, enquanto a distância para a calçada é de 9,5 metros. Essas distâncias são importantes para prever o comportamento da redução sonora desta fonte de ruído imediatamente na saída (janela) e no primeiro local com possíveis ouvintes (a calçada). Os conceitos e nomenclaturas das fórmulas são explicados na seção 2.5.1.

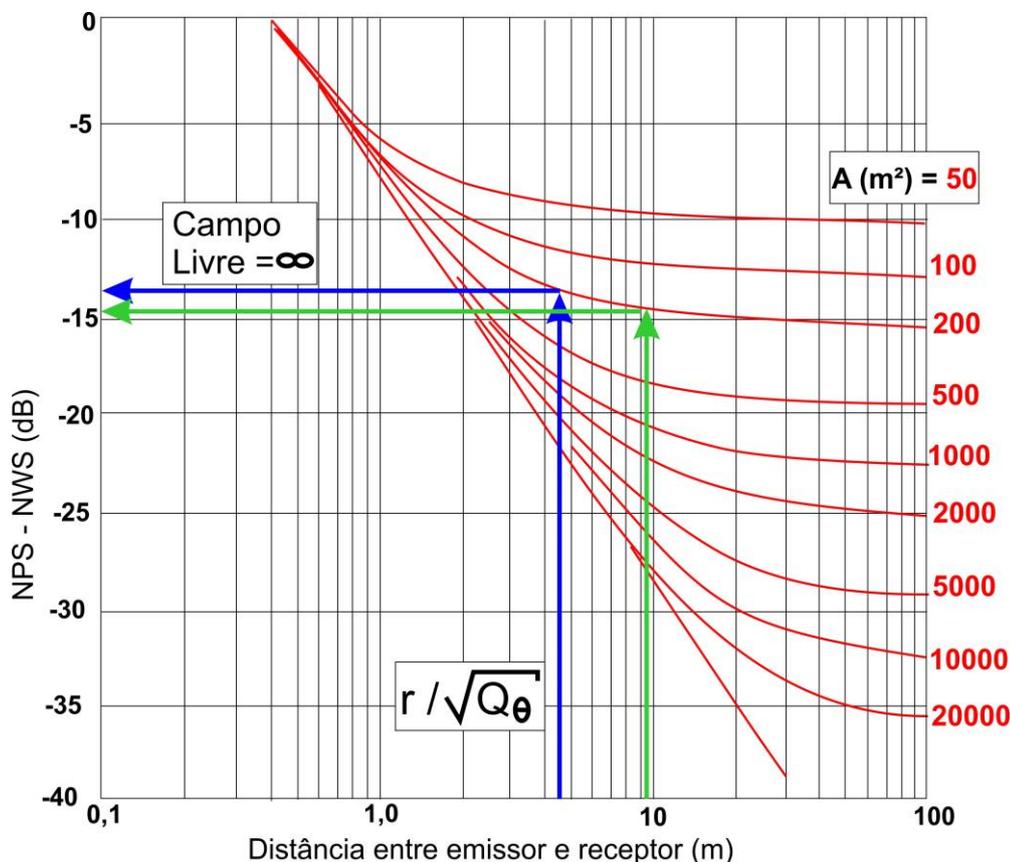
**Figura 52:** Expectativa de redução de ruído de acordo com a fórmula de Gerges (1992).

$$\begin{aligned}
 & A_{\text{Após 200m}^2 \text{ de material acústico}} = 1208 \text{ Sabines} \quad \text{(GERGES,1992)} \\
 & Q_e = 2 \\
 & \text{Para } r = 9,5\text{m} \\
 & = 10 \log \left( \frac{Q_e + 4}{4\pi r^2} + \frac{1}{A} \right) \\
 & = 10 \log \left( \frac{2}{4 \times 3,14 \times 9,5^2} + \frac{1}{1208} \right) \\
 & = 10 \log \left( \frac{2}{119,32} + \frac{1}{1208} \right) \\
 & = 10 \log (0,017 + 0,003) \\
 & = 10 \log 0,02 \\
 & = 10 \times -1,7 = -17 \text{ dB} \\
 & \text{Para } r = 4,5\text{m} \\
 & = 10 \log \left( \frac{Q_e + 4}{4\pi r^2} + \frac{1}{A} \right) \\
 & = 10 \log \left( \frac{2}{4 \times 3,14 \times 4,5^2} + \frac{1}{1208} \right) \\
 & = 10 \log \left( \frac{2}{56,52} + \frac{1}{1208} \right) \\
 & = 10 \log (0,035 + 0,003) \\
 & = 10 \log 0,038 \\
 & = 10 \times -1,42 = -14,2 \text{ dB}
 \end{aligned}$$

Fonte: O Autor (2018).

O ábaco apresentado na seção 2.5.1 e figura 53 representa a situação descrita, porém com expectativa de redução de ruído menor que o cálculo apresentado na figura 52:

**Figura 53:** Ábaco com expectativa de redução de ruído de acordo com a fórmula de Gerges (1992).



Fonte: adaptado de Gerges (1992).

Diante dos cálculos apresentados, vem a necessidade de ser incluída também uma outra perspectiva de análise na previsão da redução de ruído por absorção: a simulação computacional, pois, dessa forma, outros condicionantes, matematicamente mais complexos para descrever, são envolvidos e uma previsão realista pode ser considerada, como: a temperatura do ambiente, as distâncias entre as fontes e os pontos de medição, as características intrínsecas à fonte sonora, aproximando, assim, à situação real abordada e analisada no objeto de estudo.

## 4.2. Matriz e simulação computacional

A partir dos dados obtidos em cálculos estatísticos e medições de resposta ao impulso sonoro, criou-se uma matriz combinando diferentes posicionamentos de

painéis acústicos feitos em material com NRC (do inglês, coeficiente de redução de ruído) de 0,74 posicionados nas paredes e abaixo da cobertura para análise computacional no *software* EASE 4.3, permitindo analisar a influência do nível de pressão sonora (NPS) total resultante das reflexões sonoras nas paredes internas da edificação.

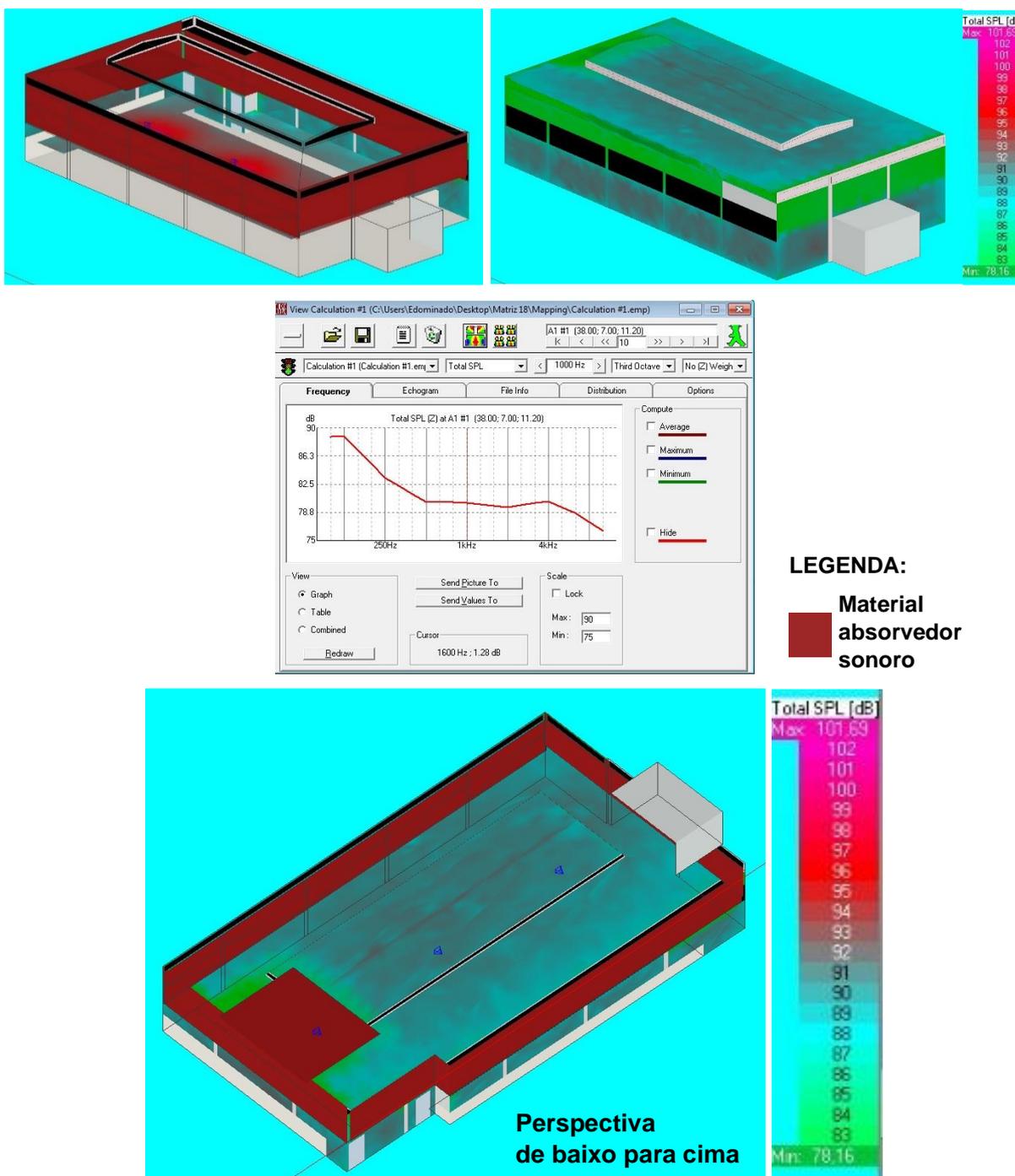
Todos os procedimentos de simulação respeitaram as etapas metodológicas no que diz respeito a posicionamento de fonte de ruído e pontos de medições. Dessa forma foi possível, com base na média dos resultados obtidos em cada simulação, analisar a influência do Nível de Pressão Sonora (NPS) total resultante das reflexões sonoras nas superfícies internas da edificação.

Com a simulação, torna-se possível obter um mapeamento acústico geral para cada combinação de arranjo de superfícies absorvedoras (figura 54, a seguir), bem como a aplicação das três fontes de ruído (F1, F2, F3 e até mais fontes) e pontos de medições simultaneamente, o que do ponto de vista prático descrito na metodologia, geraria, consideravelmente, uma maior quantidade de dados para análise, bem como demandaria um maior número de equipamentos para aferição e um maior número de pessoas para realizar as medições.

Outra possibilidade, com o uso da ferramenta de auralização do *software* EASE 4.3, é ouvir o desempenho acústico de cada um dos arranjos, o que em condições reais, seria impossível do ponto de vista econômico, pois o ginásio poliesportivo não é um ambiente laboratorial. Por outro lado, um viés para essa metodologia é que as ferramentas de simulação computacional disponíveis para este trabalho permitem calcular algumas variáveis dos condicionantes presentes em uma situação real, como temperatura, propriedades dos alto-falantes na fase de emissão sonora na área interna do objeto de estudo, embora seja necessário o uso de dois *softwares* distintos para realizar a tarefa de avaliação do impacto sonoro em seu meio externo.

Outra limitação está relacionada à emissão sonora virtual do *software* EASE 4.3, pois ela é homogênea em todas as frequências em seu simulador de fonte dodecaédrica, desconsiderando características de baixa de rendimento para as frequências abaixo de 200Hz de fontes dodecaédricas reais, em função do tamanho dos falantes da fonte utilizada nas medições descrita na metodologia deste trabalho.

**Figura 54:** Mapeamento dos NPS (em dB) em função do ligamento de 3 fontes sonoras simultâneas presente no arranjo 18.



Fonte: O Autor (2018).

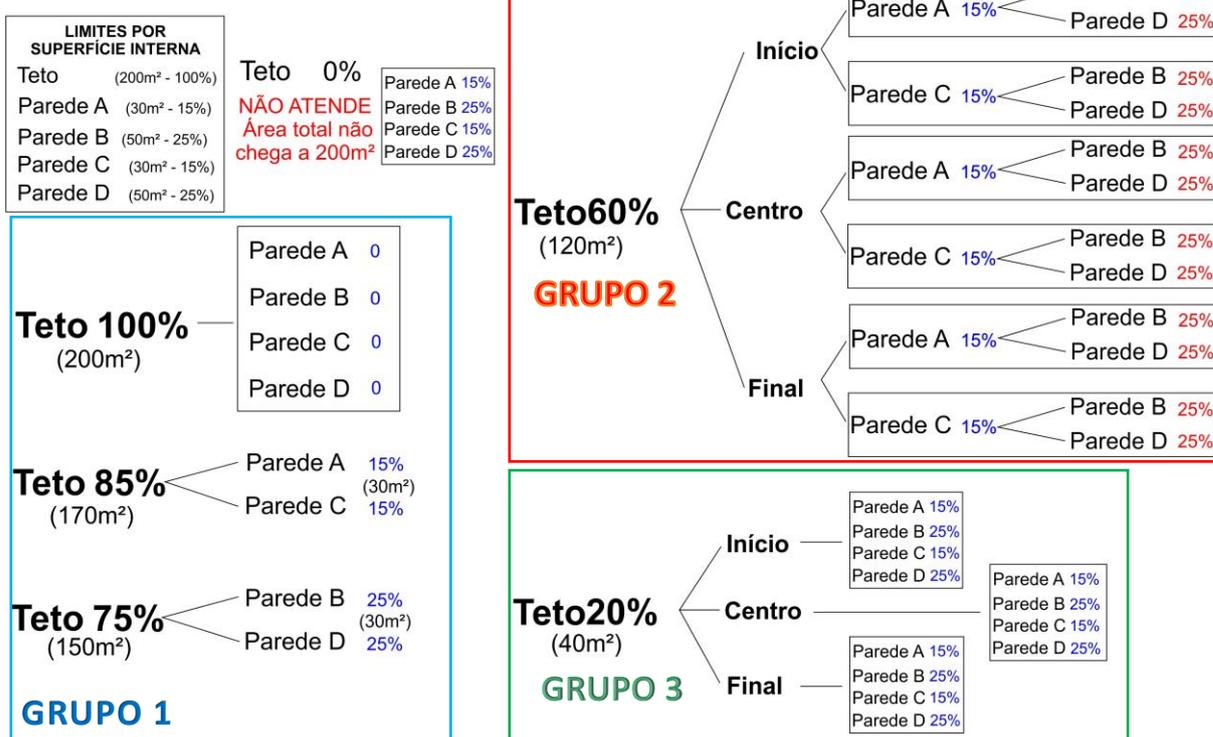
Nota-se, na figura 55, que a inserção de materiais sonoabsorventes no modelo simulado gera uma atenuação na energia acústica na face interna do objeto de estudo correspondente à sua aplicação, em consequência, gera uma atenuação das amplificação sonora no recinto. Os arranjos de posicionamento de superfícies sonoabsorventes foram definidos em uma matriz, considerando variáveis fixas:

- Tempo de reverberação (TR 60): 1,2 segundos para 500Hz, conforme ábaco de TR ótimo para espaços de conferência e salas multiuso;
- 200m<sup>2</sup> de material sonoabsorventes com NRC fixo de 0,74, equivalente à lã de vidro de 50mm envolta em tecido ortofônico de alta transparência acústica;
- Absorção total (A) do objeto de estudo: 1208 Sabines definido em cálculo de TR (Equação de Sabine).

**Figura 55:** Combinações possíveis de arranjos das superfícies sonoabsorventes no interior do objeto de estudo

### Absorção alcançada para TR60 de 1,2s: 1208 Sabines (500Hz)

20 combinações plausíveis utilizando toda a área possível de aplicação do painel acústico

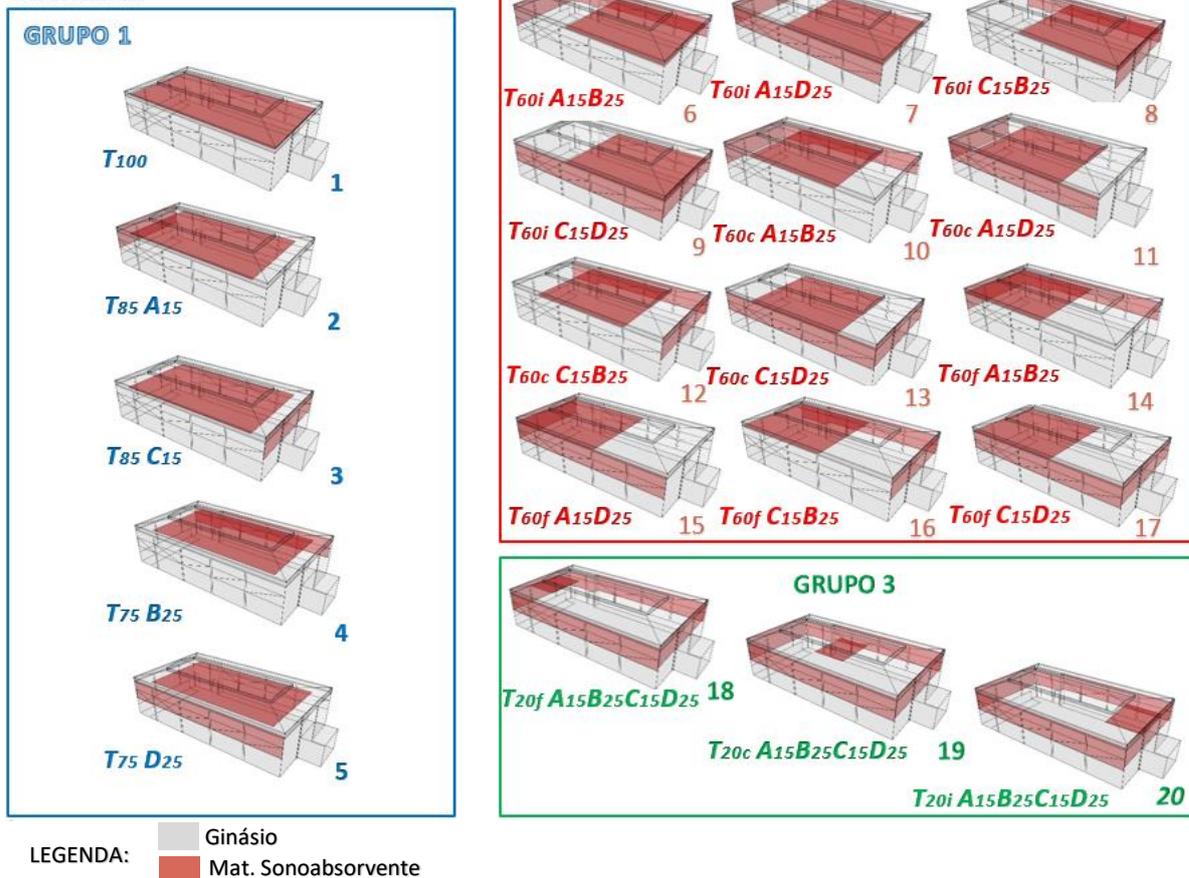


Fonte: O Autor (2018).

Para facilitar a compreensão visual na disposição dos arranjos definidos na matriz, cada um dos arranjos são apresentados em seus respectivos grupos na figura 56. O agrupamento foi definido pela disposição de materiais abaixo da coberta (teto), sendo grupo 1 para teto com 75 a 100% de material sonoabsorventes; grupo 2, para teto com 60%; e grupo 3 para teto com 20% de preenchimento com esse material. A distribuição ao redor das outras faces internas se deu pela limitação de área disponível para receber o material sonoabsorvente em suas superfícies.

**Figura 56:** Visualização das combinações possíveis de arranjos das superfícies sonoabsorventes no interior do objeto de estudo.

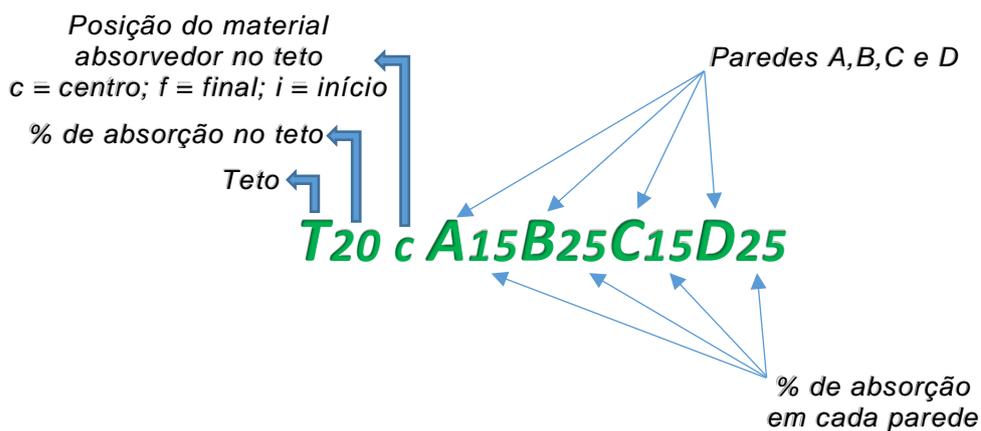
**Ilustração dos grupos e arranjos da matriz**



Fonte: O Autor (2018).

A nomenclatura de cada arranjo segue a distribuição estabelecida na matriz das figuras 55 e 56. O código do arranjo número 19 está descrito na figura 57, a seguir:

**Figura 57:** Decodificação da nomenclatura definida na matriz.



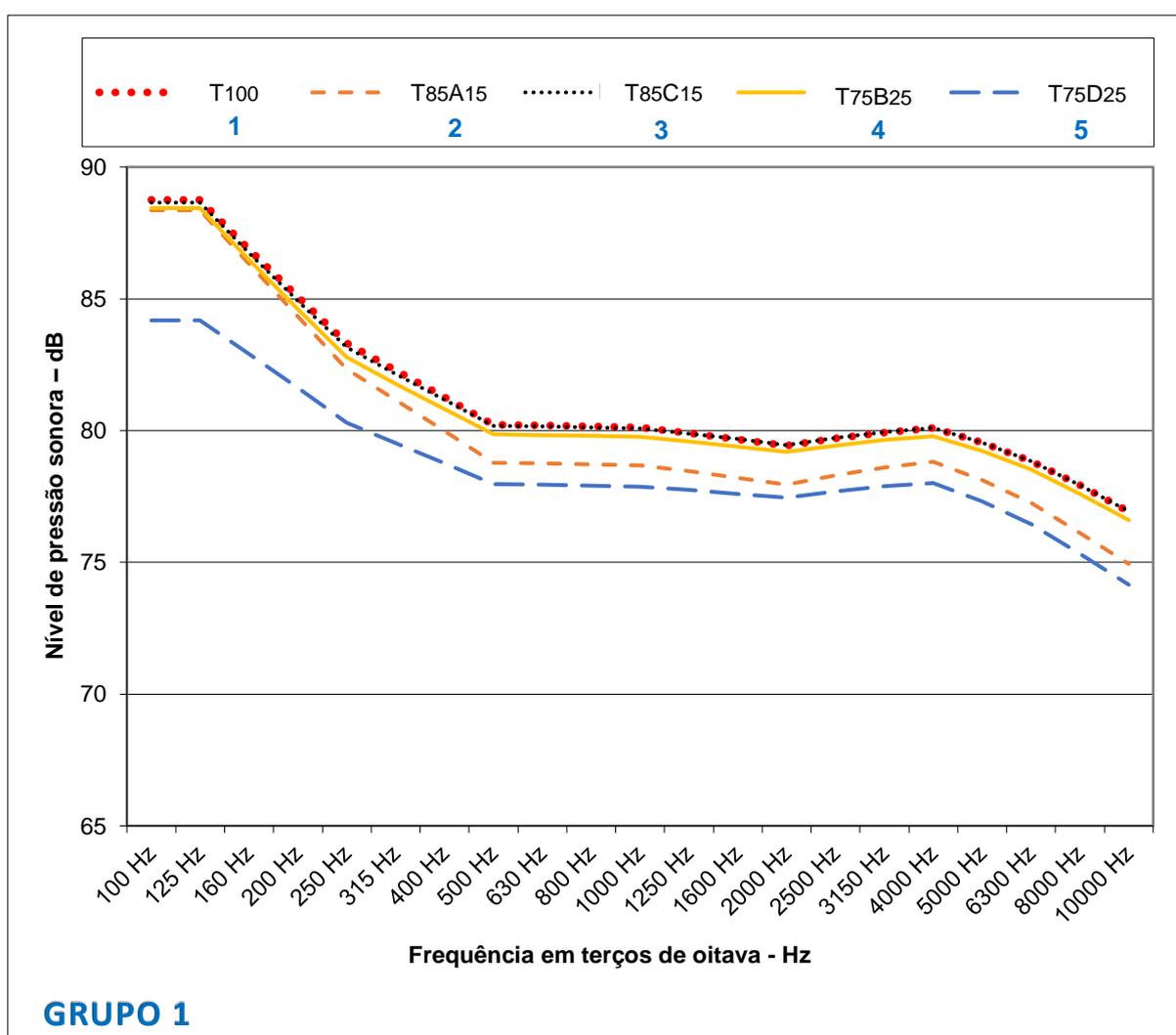
Fonte: O Autor (2018).

A disposição dos materiais nas paredes internas do modelo simulado se deu na altura correspondente às janelas, de modo que, num contexto prático, os dispositivos acústicos inseridos no recinto não sofressem com impactos de bolas, ou de crianças.

### 4.3. Apresentação dos dados e representação no mapa de ruído urbano

Os resultados das simulações são apresentados nos gráficos a seguir.

**Gráfico 8:** NPS para cada um dos arranjos do grupo 1 da matriz.



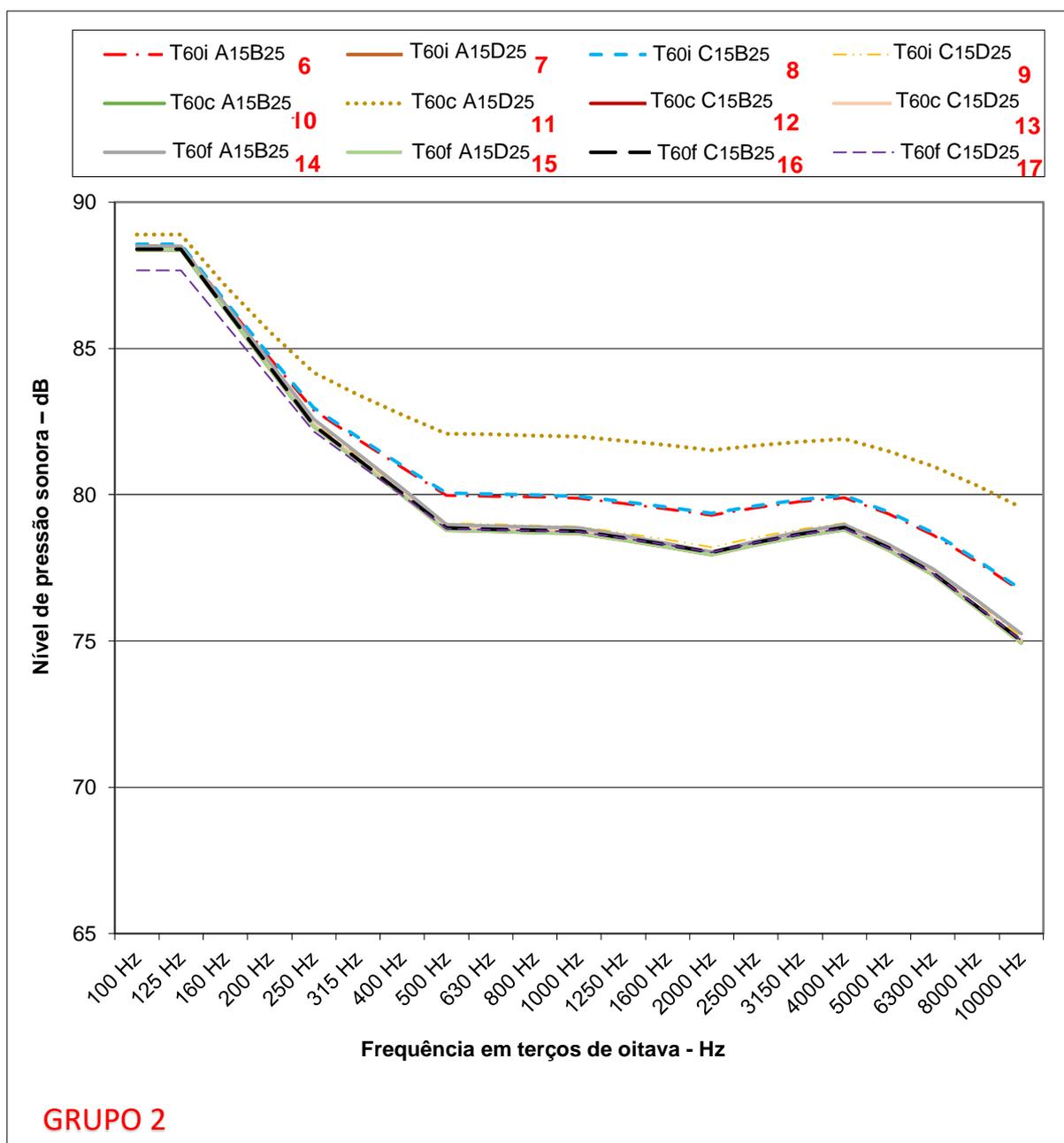
Fonte: O Autor (2018).

Nos arranjos presentes no grupo 1, o que obteve melhor desempenho na redução de nível de pressão sonora global foi o arranjo de número 5, com 75% de material sonoabsorventes abaixo da cobertura (teto) e 25% na parede D. O destaque em seu desempenho deu-se, em todas as frequências, com significativa diferença na

região dos graves (100Hz a 250Hz) quando comparado ao segundo melhor desempenho, o arranjo T85A15.

Considerando a emissão sonora virtual de 95dB igual para todas as frequências, tem-se, já nos primeiros resultados, considerável redução de ruído pela mitigação das reflexões sonoras dentro do objeto de estudo.

**Gráfico 9:** NPS para cada um dos arranjos do grupo 2 da matriz.



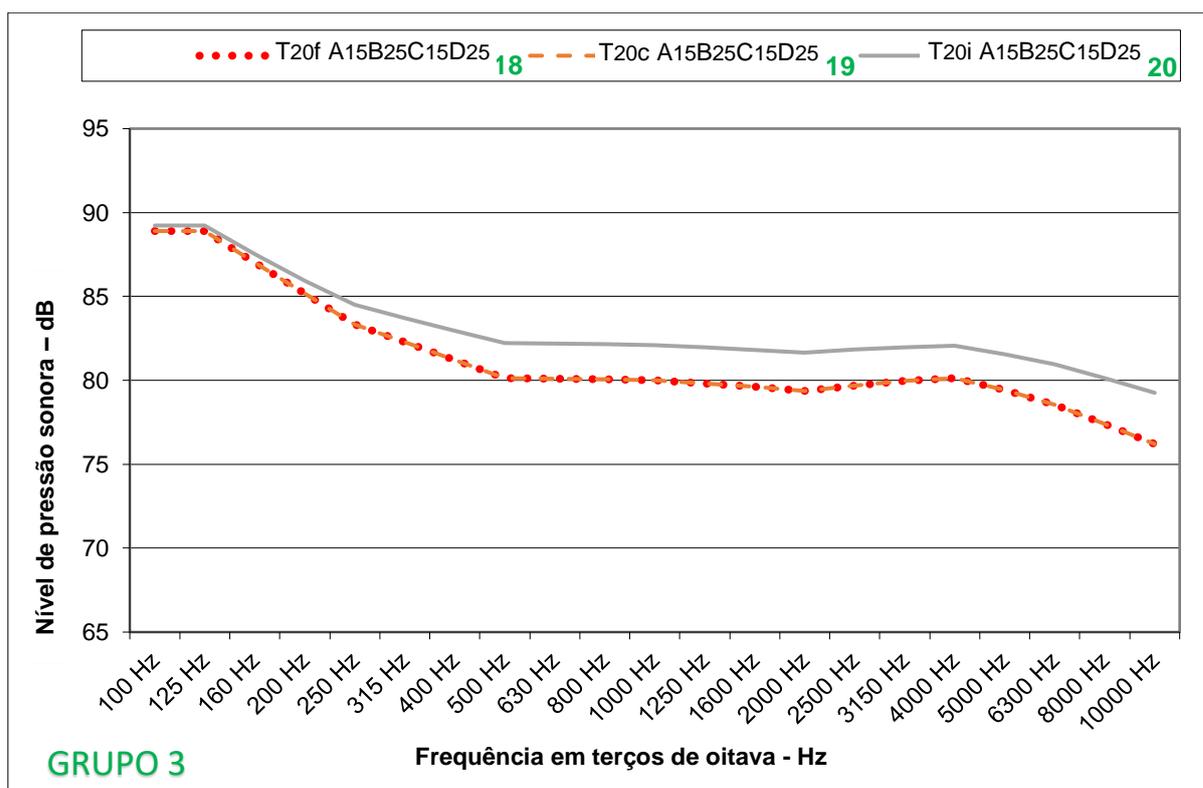
Fonte: O Autor (2018).

No grupo 2, que representa os arranjos com 60% de material absorvedor no teto, há uma série de arranjos com desempenho próximo dos níveis mais baixos,

entretanto, o arranjo 16, com 60% de material no teto, 15% na parede C e 25% na parede D, mostrou um melhor desempenho na absorção de baixas frequências.

A melhoria da absorção sonora no objeto de estudo, em função de sua geometria interna, deve-se, provavelmente, ao posicionamento do material sonoabsorvente acima da entrada do ginásio, ao fechamento de toda a janela de maior extensão (voltada ao Edifício Reclamante) e ao mesmo material no teto acima da arquibancada da parede A.

**Gráfico 10:** NPS para cada um dos arranjos do grupo 3 da matriz.

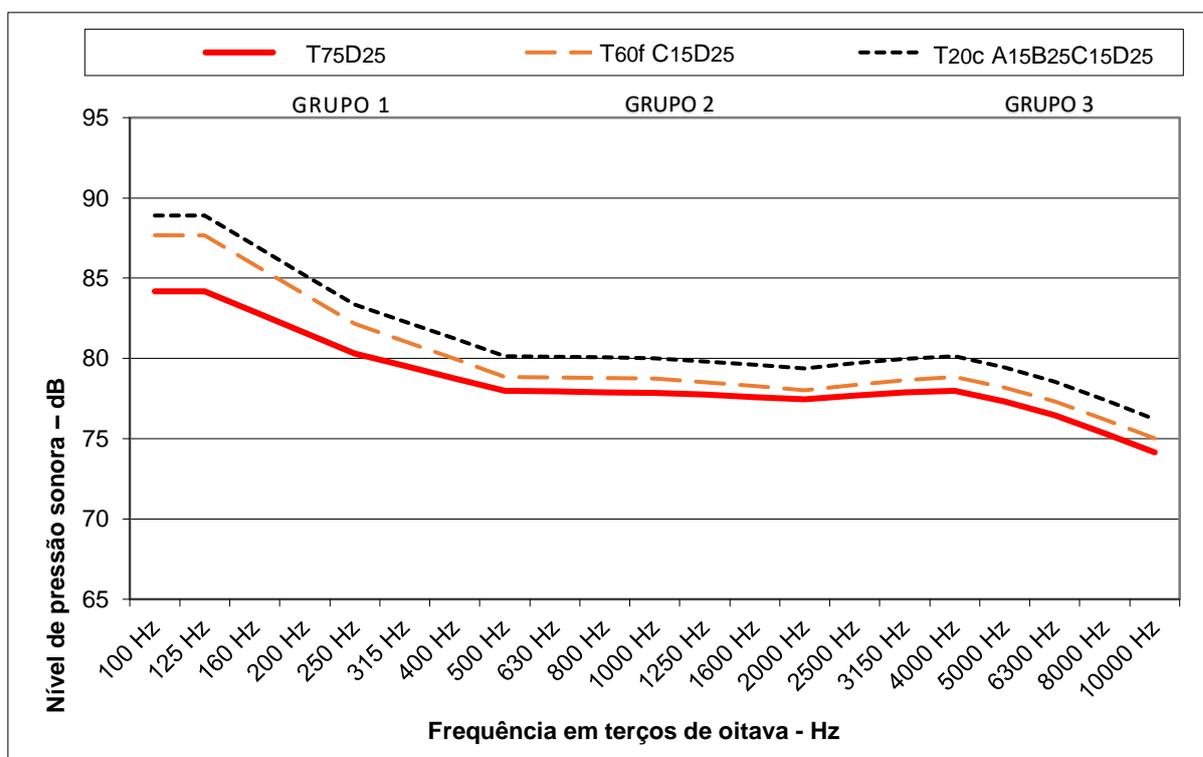


Fonte: O Autor (2018).

No grupo 3, o resultado dos arranjos com 20% de material absorvedor no centro e no final do teto foram rigorosamente idênticos. Após 3 simulações consecutivas para a investigação da diferença no comportamento sonoro do arranjo com 20% de material absorvedor no início do teto, não foi possível prever a causa dessa diferença, mas pode-se inferir sobre algum padrão de reflexões sonoras que ganhe considerável reforço na faixa de frequências a partir de 160Hz próximo da arquibancada da parede A e atue, de alguma forma, como um padrão ressonante, ou alguma superfície entre piso e cobertura que estabeleça um padrão ressonante a ponto de trazer esse ganho considerável de nível de pressão sonora .

Para todos os efeitos, se comparados aos grupos 2 e 1, o desempenho dos arranjos do grupo 3 foram os mais deficientes, o que mostra a importância da absorção sonora abaixo da cobertura para evitar grandes reflexões diretas entre o piso (zona onde se encontra a maioria dos emissores de ruído – pessoas) e o teto (zona das primeiras reflexões sonoras).

**Gráfico 11:** NPS dos melhores arranjos de cada um dos 3 grupos da matriz.

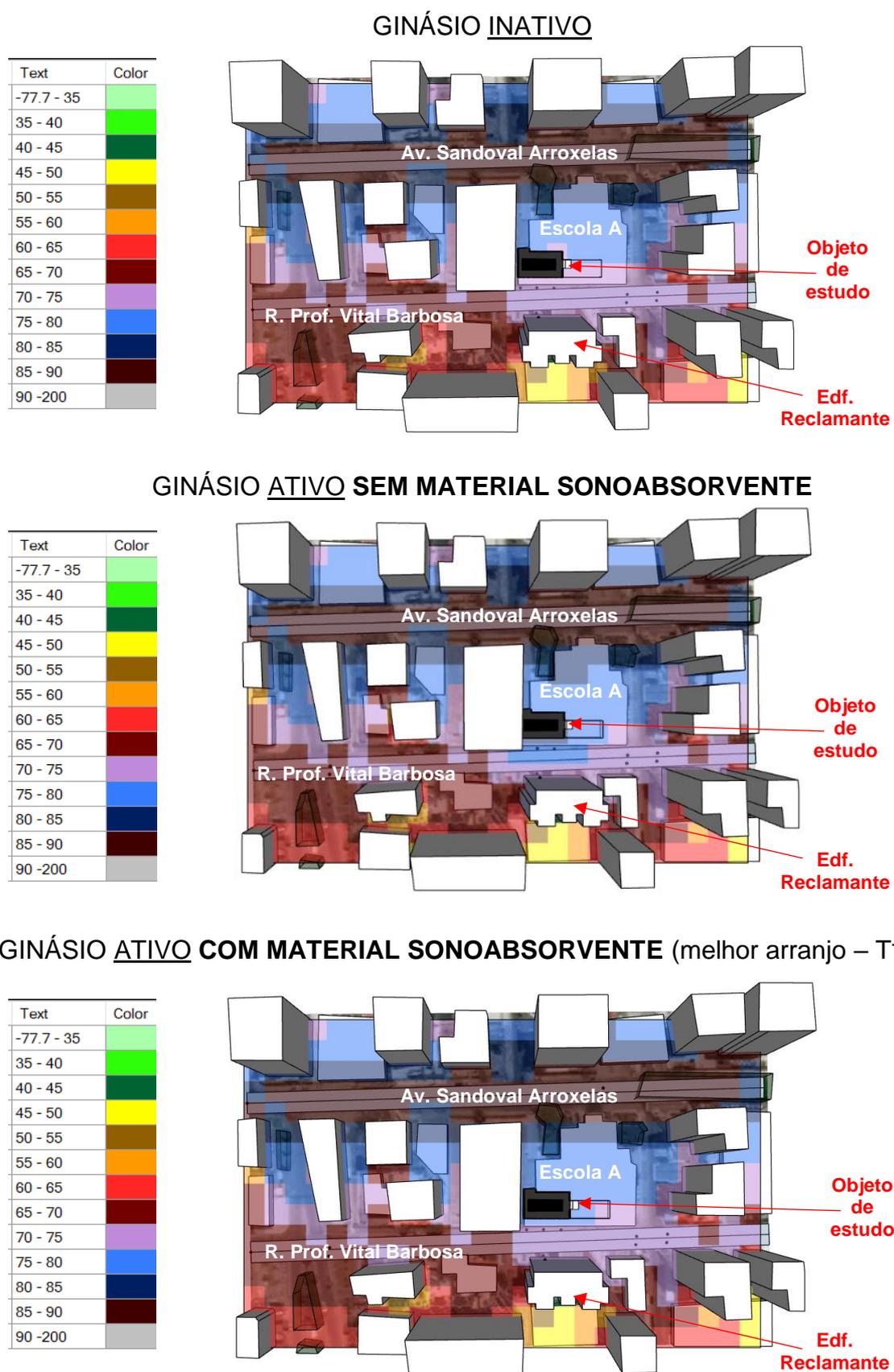


Fonte: O Autor (2018).

Por fim, ao cruzar os 3 melhores arranjos de cada grupo, tem-se o melhor desempenho estabelecido pelo arranjo 5 do grupo 1, com 75% de material sonoabsorventes no teto e 25% do mesmo material na parede D, que é voltada para o Edifício Reclamante. Pode-se inferir, com isso, que a geometria do objeto de estudo, de alguma forma, direciona o som amplificado para fora da edificação principalmente pela janela disposta na parede D, coincidentemente, voltada para a R. Prof. Vital Barbosa.

O mapeamento sonoro urbano representado na figura 58, a seguir, mostra a influência do som da quadra poliesportiva antes e depois da aplicação das superfícies absorvedoras nas faces internas da edificação. Há, também a representação do ginásio inativo. É possível notar a diminuição da abrangência do ruído da quadra após a aplicação dos materiais sonoabsorventes do arranjo 5 do grupo 1 (T75D25).

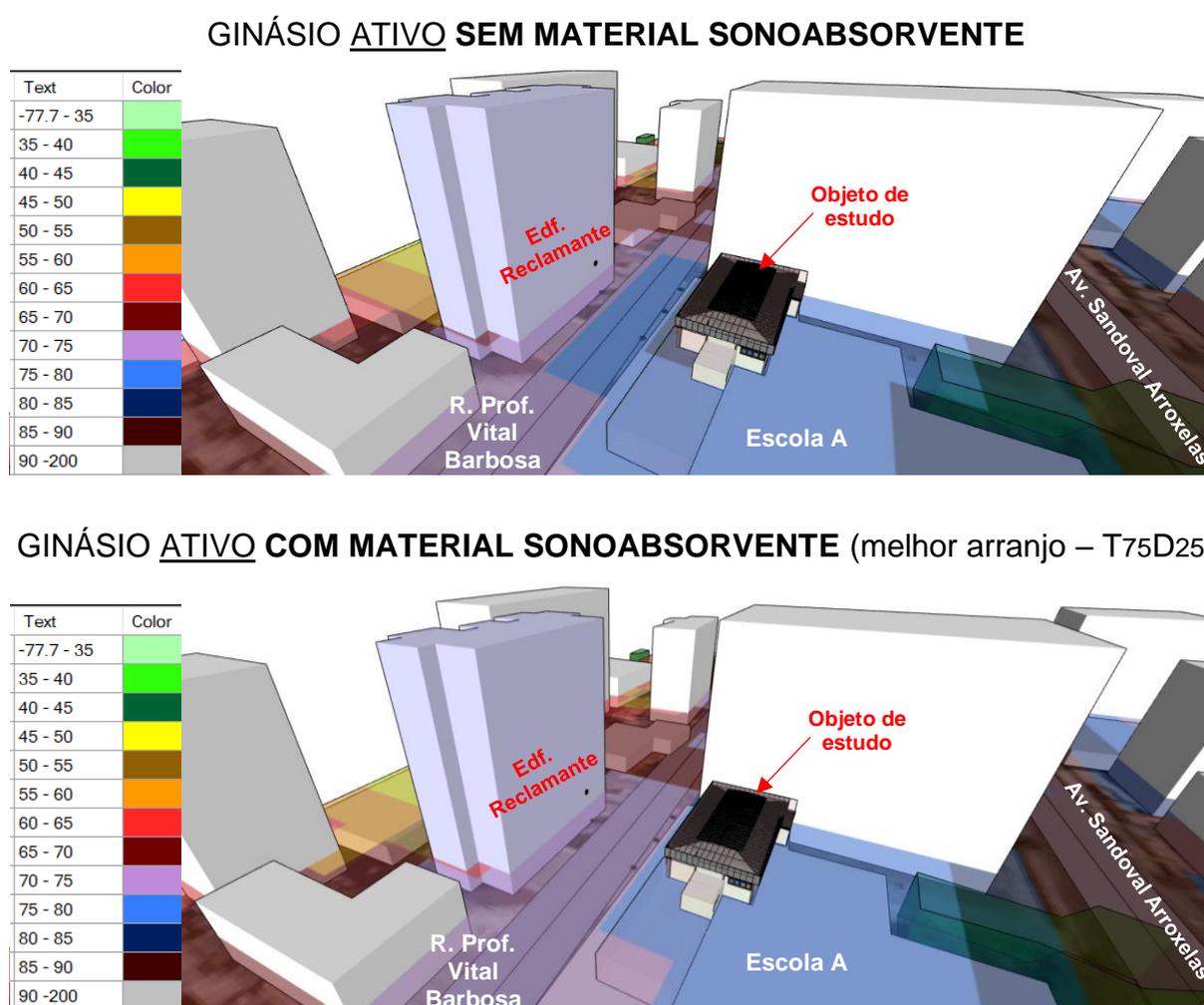
**Figura 58:** Mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação.



Fonte: O Autor (2018).

É possível, também, criar imagens em perspectiva com a finalidade de visualizar, com mais clareza, a abrangência da fonte emissora de ruído no interior do objeto de estudo, onde consegue-se constatar, ainda mais, o motivo do Edifício Reclamante (destacado em lilás) registrar queixas por incômodo de ruído. É importante ressaltar que o Noise 3D não mapeia as fachadas dos edifícios.

**Figura 59:** Perspectiva do mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação.



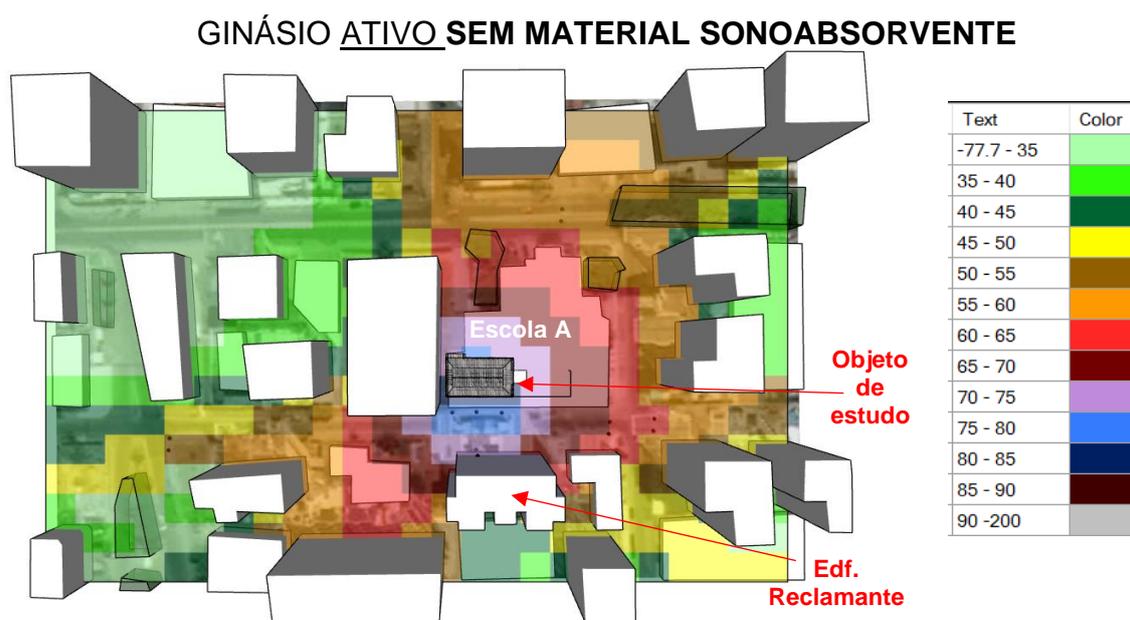
Fonte: O Autor (2018).

Nota-se, pela imagem do ginásio ativo sem material sonoabsorvente, que os níveis de ruído ao redor da abertura voltada para o Edifício Reclamante chegam a níveis de 80 a 85 dB (cor azul royal), evidenciando o acúmulo de energia sonora gerado dentro do ginásio e ejetado pela referida abertura. Assim, a aplicação do material sonoabsorvente contribui para a diminuição da abrangência do ruído da quadra poliesportiva estudada. Uma vez que os níveis de ruído em azul (75 – 80 dB)

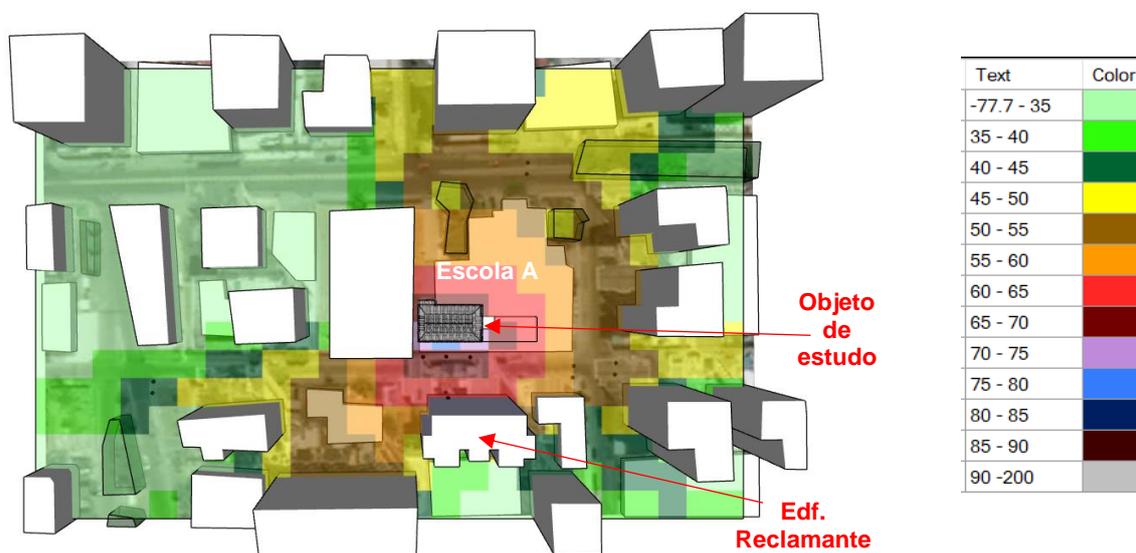
também se fazem presentes no entorno da escola A por influência do ruído de tráfego gerado na Av. Sandoval Arroxelas, é possível que haja mascaramento sonoro entre o ruído gerado pela avenida e pelo ginásio, permitindo assim dificultar a identificação da incidência sonora do ginásio que causa o incômodo aos moradores do Edifício Reclamante.

Com o *software* Noise 3D, permitiu-se a manipulação de um modelo virtual que possibilita a exclusão da influência do ruído das vias (figura 60).

**Figura 60:** Mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação sem a influência do tráfego das principais vias do recorte urbano.



**GINÁSIO ATIVO COM MATERIAL SONOABSORVENTE (melhor arranjo – T75D25)**

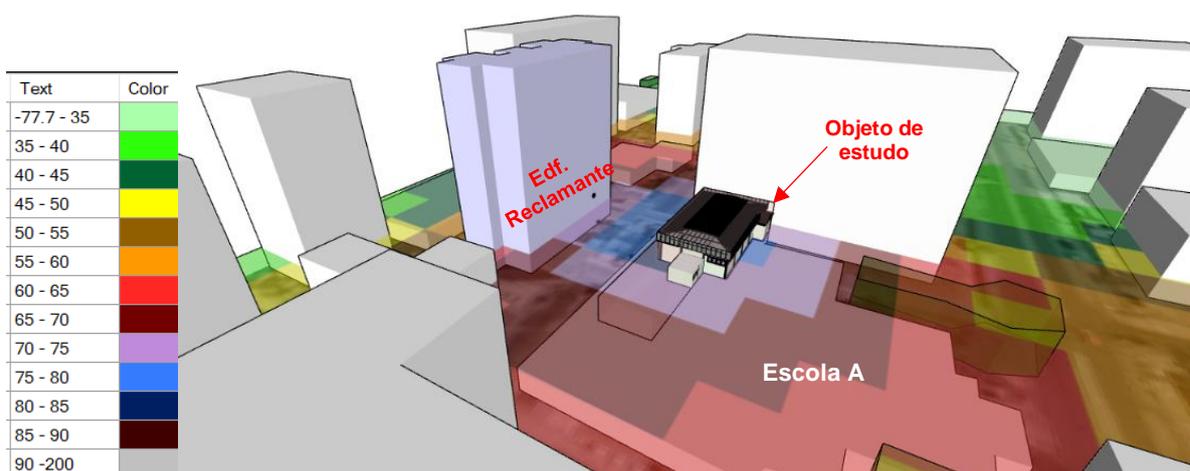


Fonte: O Autor (2018).

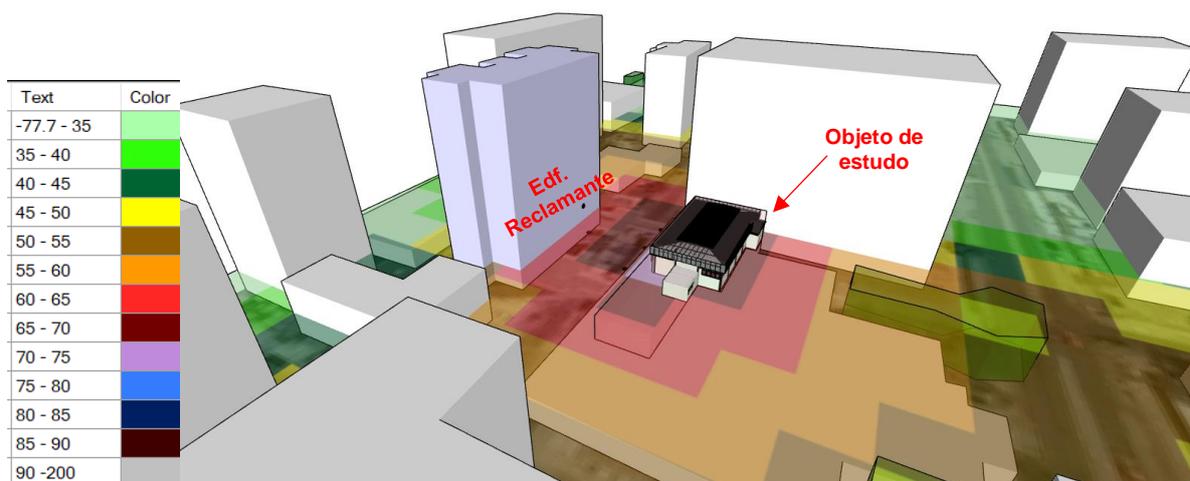
Dessa forma, é possível avaliar a influência direta da redução de ruído por absorção no contexto de uma edificação já construída onde só essa técnica seja viável tanto do ponto de vista econômico quanto do ponto de vista do conforto ambiental. A figura 60 mostra a influência dessa técnica no mapeamento de ruído.

**Figura 61:** Perspectiva do mapeamento sonoro do melhor arranjo da matriz (T75D25) antes e após sua aplicação sem a influência do tráfego das principais vias do recorte urbano.

### GINÁSIO ATIVO SEM MATERIAL SONOABSORVENTE



### GINÁSIO ATIVO COM MATERIAL SONOABSORVENTE (melhor arranjo – T75D25)



Fonte: O Autor (2018).

Ao excluir a componente das vias na influência do ruído no mapeamento sonoro urbano da área analisada, nota-se claramente a influência e o alcance da energia acústica gerada pela quadra poliesportiva, bem como a nítida diminuição do impacto sonoro na circunvizinhança em função da aplicação dos materiais sonoabsorventes nas superfícies internas do objeto de estudo.

As perspectivas da figura 61 mostram, sob um outro ponto de vista, o alcance do ruído gerado pelo objeto de estudo, enquanto a Tabela 17 apresenta a quantificação dessa atenuação em dB, juntamente com os valores de Leq obtidos na fase 1 da metodologia e os valores simulados no EASE com e sem a aplicação do material sonoabrovente.

**Tabela 17:** NPS (em dB) por frequência e níveis de ruído globais do objeto e das curvas NC para ginásios poliesportivos.

Leq (Interior)	Frequências (Hz)											Leq (dB) Global
	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
<b>Medição Ruído Branco (Sonômetro)</b>	63,7	65,5	69,8	68,2	73,5	84,3	87,4	84,6	84,2	82,6	69,0	<b>92,1</b>
<b>Medição Ruído Branco (Mic. Omni.)</b>	64	67,8	70,1	71,8	77,4	89,6	90,4	89,9	88,4	86,7	78,4	<b>96,3</b>
<b>Medição Sinal Sweep (Mic. Omni.)</b>	50,5	56,7	65,7	75,9	73,1	87,3	88,8	85,8	82,9	79,5	61,9	<b>93,1</b>
<b>Simulação (EASE)</b>	0	0	0	93,7	93,4	93,2	92,8	93,1	89,7	92,4	0	<b>101,2</b>
<b>T75D25 (EASE)</b>	0	0	0	88,6	85,3	83,0	82,6	82,4	82,5	80,2	0	<b>92,8</b>

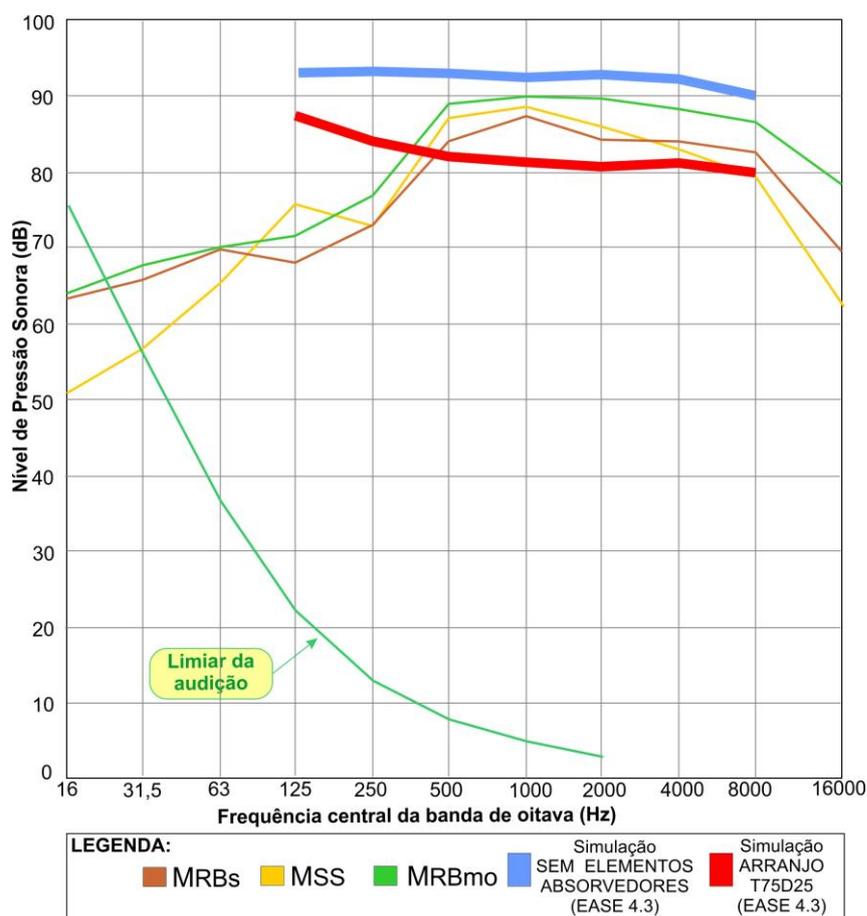
Fonte: O Autor (2018).

Os mapeamentos ilustram uma diminuição do nível de ruído global de 8,4 dB entre o ginásio sem material sonoabsorvente e com este material. Se a análise for ampliada para frequências específicas (em bandas de oitava – Tabela 17), a diferença de nível entre elas varia entre 5dB e 11 dB entre frequências baixas e altas pelo fato de que o material absorvedor escolhido é eficiente para as frequências médias e altas.

O gráfico 12 ilustra os valores da Tabela 17, permitindo a comparação, em igualdade de condições, do método de simulação, que mostrou-se aproximado para as frequências de 500 Hz adiante em relação aos valores obtidos nas diversas técnicas de medições de diagnóstico acústico do ginásio analisado. Infere-se, dessa forma, que em um contexto prático, uma vez que o arranjo T75D25 seja executado na prática, a tendência é que a redução de NPS seja ainda mais efetiva.

Pode-se afirmar, em um contexto prático, que a técnica de redução de ruído por absorção é capaz de eliminar a amplificação gerada pelas reflexões sonoras das faces internas do objeto de estudo.

**Gráfico 12:** Valores de Leq pós-simulação com arranjo T75D25 confrontados com valores simulados nas etapas de diagnóstico.



Fonte: O Autor (2018).

#### 4.4. Observações principais do capítulo

O capítulo 4 apresentou os dados que aproximaram o procedimento metodológico com a simulação computacional descritos no capítulo 3. Dessa forma, foi possível estudar, com os *softwares* disponíveis para esta pesquisa (o EASE 4.3 e o Noise 3D), a influência esperada do desempenho de arranjos de superfícies sonoabsorventes para impedir a amplificação do ruído interno do objeto de estudo selecionado, bem como a sua influência no contexto de seu entorno.

O EASE 4.3, que unicamente abrange a análise do condicionamento acústico, e o Noise 3D, que permite a análise sonora ambiental, possuem um dado em comum: o nível de pressão sonora global e por frequência, possibilitando a conexão entre ambos os *softwares*.

Ou seja, uma vez que o primeiro programa forneceu os valores da energia acústica interna de um recinto, foi possível, com o segundo, estimar a energia acústica produzida e emitida por uma edificação no contexto urbano, aplicando os valores obtidos no EASE 4.3 às superfícies emissoras de ruído da edificação emissora no mapeamento sonoro urbano no Noise 3D, juntamente com todos os dados de tráfego levantados e processados para alimentar o software e garantir uma simulação mais aproximada possível da realidade.

Os valores estão descritos em dB pelo fato de o trabalho tratar de uma investigação no campo da energia acústica, sem considerar ponderações nos níveis de pressão sonora. Os resultados receberam comentários descritivos, onde a conclusão do trabalho se dará no capítulo seguinte.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ginásios poliesportivos possuem diversas tipologias que variam em função tanto pela finalidade do uso, quanto pelas condições climáticas do local em que ele se insere. As normas relacionadas a esse tipo de ambiente são mais detalhadas no âmbito internacional. No Brasil, as menções a ginásios poliesportivos são pontuais. De qualquer forma, esses locais são marcos visuais e sonoros quando inseridos em qualquer contexto urbano, tendo em vista sua arquitetura diferenciada e a produção de ruído gerada pelo seu uso, cada vez mais multifuncional por possibilitar a aglomeração de pessoas em eventos como feiras, shows, entre outros.

O impacto sonoro de ambientes poliesportivos na circunvizinhança foi estabelecido por uma série de fatores:

- a predominância do clima quente e úmido brasileiro demanda que essas edificações sejam abertas a fim de favorecer ventilação cruzada;
- o ônus financeiro em climatizar um ambiente de grandes dimensões impede o procedimento de isolamento acústico;
- as construções, feitas com materiais leves e de baixo coeficiente de absorção acústica amplificam o ruído gerado internamente, induzindo ao ouvinte a sensação de que o som produzido no local é mais elevado que o ruído emitido originalmente.

Diante dessa realidade, a única alternativa de controle do ruído gerado nesta situação é o emprego da técnica de redução de ruído por materiais absorvedores, que tem como objetivo principal a redução da amplificação sonora gerada dentro do recinto, conseqüentemente, o ruído que evade o mesmo passa a ser de menor amplitude.

O objeto de estudo selecionado passou por detalhada análise arquitetônica e acústica. O entorno também foi analisado e o diagrama metodológico pôde ser aplicado através de diversas medições e simulações computacionais, onde técnicas de emissão de ruído distintas (emissão de ruído estacionário por ruído branco e medição de resposta impulsiva por sinal *sweep*) e equipamentos distintos foram utilizados (sonômetro classe 1 e microfone omnidirecional conectado ao *software Room EQ Wizard*).

Os equipamentos utilizados nos processos de medição *in situ* são adequados para a avaliação da influência da voz humana, uma vez que a fonte dodecaédrica não emite o nível de pressão sonora com a mesma eficiência em frequências abaixo de 200Hz, como é mostrado claramente, no gráfico 12, a diminuição dos valores obtidos em todos os métodos de medição. Sugere-se, então, a inserção de subwoofers, ou alto-falantes de 15 polegadas ou mais, capazes de emitir um NPS mais equilibrado em faixa abaixo dessa frequência.

Os resultados obtidos na metodologia validaram o processo de simulação para a investigação de redução de ruído por absorção com o uso dos *softwares* EASE 4.3 e Noise 3D para o mapeamento do ruído. Dessa forma, foi possível criar uma matriz de distribuição de 200m<sup>2</sup> de material absorvedor com NRC fixo de 74%. Esse quantitativo foi determinado pela equação TR (tempo de reverberação) de Sabine para atingir o valor ideal de 1,2 segundo para 500Hz. A variação da distribuição do material sonoabsorvente foi feita tomando como referência a aplicação no teto, com 100%, 85%, 75%, 60% e 20%. O restante do material foi distribuído pelas paredes na altura das aberturas.

Dentre os resultados das simulações dos arranjos, notou-se que as performances dos arranjos com 20% de material sonoabsorvente no teto tiveram menor eficiência, possibilitando concluir que o teto possui grande influência na amplificação do ruído e a aplicação de material absorvedor neste local evita grandes reflexões sonoras e que não adianta aplica-lo somente nas paredes. As melhores performances de redução de ruído global ( $L_{eq}$ ) foram dos arranjos com aplicação no teto que alcançava o centro e o fundo do objeto de estudo, bem como a parede voltada à R. Prof. Vital Barbosa (parede da vista D na planta baixa – Ver apêndices 3 a 7).

A diminuição do ruído global ( $L_{eq}$ ) interno entre os valores simulados no *software* EASE 4.3 sem e com o melhor arranjo de material sonoabsorvente (75% no teto e 25% na parede D) foi de 8,4dB. Considerando a análise em bandas de oitava, a diferença de NPS para frequências médias e altas varia entre 9dB e 11dB, enquanto para as frequências de 125Hz e 250Hz variam de 5dB a 8dB por conta da menor capacidade absorvedora do material escolhido. De acordo com os conceitos físicos do som abordados no apêndice 1, uma vez que uma fonte sonora com diretividade Q definida por, pelo menos, 3 faces internas do ambiente em que ela atua em um recinto

( $Q = 8$ ), seu som é amplificado em 9dB. Infere-se, então, que a redução de ruído por absorção elimina justamente essa componente física do som que causa a amplificação sonora e o direcionamento do ruído, como foi possível ver na figura 60, que corresponde ao mapeamento acústico sem a influência das vias. Uma vez que os dados de redução de ruído por absorção permitiram uma atenuação global na ordem de 9dB, sendo 3dB acima do limite prático sugerido por Gerges (1992).

No caso de sistemas de sonorização, é possível obter, a partir de um projeto acústico mais elaborado, planos de reflexão e absorção sonora em pontos estratégicos para uma distribuição sonora homogênea com baixo NPS e alta inteligibilidade. Entretanto, considerando o ruído de uma torcida, a dificuldade de controle da emissão de ruído aumenta consideravelmente: o uso de buzinas, apitos, gritos da torcida e dos próprios jogadores, fazem com que esse planejamento perpassa pela estratégia de remanejamento de arquibancadas. De qualquer forma, no caso do objeto de estudo, as arquibancadas não podem ser remanejadas facilmente, pois são fixas. Diante desse fato, as limitações encontradas se dão também no campo da interpretação dos dados normativos à realidade brasileira. Mesmo que todos os torcedores, no mundo inteiro, sejam “barulhentos”, ginásios poliesportivos europeus possuem isolamento acústico e os valores de referência são para a área externa das edificações – NR (FAHY, 2000).

Como sugestão para trabalhos futuros, cabe um aprofundamento analítico em ginásios não-escolares e de maior porte, bem como a avaliação da influência de tipos de coberturas de ginásios na amplificação do ruído interno. No presente estudo, não foi possível avaliar o impacto da vizinhança por meio de *surveys*, estratégia essa que seria enriquecedora do ponto de vista analítico. Entretanto, a função deste trabalho focou na validação do uso da simulação computacional aliada às técnicas de mapeamento de ruído urbano baseados na norma ISO 1996-2 (ISO, 1987). Portanto, este trabalho possibilitou descobrir uma nova perspectiva de análise de ruído de edificações, onde algumas edificações são as fontes de incômodo sonoro em um contexto urbano. Em análise de referencial teórico e normativo, não foi encontrada nenhuma norma que tratasse edificações específicas (a exemplo de ginásios poliesportivos) como fontes de ruído, sendo necessária a importação de conceitos normativos relacionados a casas de máquinas, como a ISO 16032 (ISO, 2004), para ampliar o entendimento dos processos metodológicos abordados.

## REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.151**: Acústica - Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento. 4. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2000.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.152** – Níveis de Ruído para Conforto Acústico. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 10.152** – Acústica – Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em ambientes internos às edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

\_\_\_\_\_. **NBR 12.179** – Tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

\_\_\_\_\_. **NBR 15.575** – Edifícios Habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Normas brasileiras de acústica.** Disponível em: <http://www.abnt.org.br/pesquisas/?searchword=ac%C3%BAstica&x=0&y=0>  
Acesso em 24 mar. 2018

AFMG TECHNOLOGIES GMBH; ACOUSTIC DESIGN AHNERT. **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](http://www.afmg-support.eu/AFMGDownloads/Downloads.aspx?SWP=EASE&FILE=EASE_4.3_Tutorial_English.pdf)> Acesso em 2 nov. 2017.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica aplicada ao controle de ruído.** 2. ed. São Paulo: Editora Blücher, 2011. 380 p.

BRANDÃO, Eric. **Acústica de salas: projeto e modelagem.** São Paulo: Blucher, 2016. 654p.

BRASIL. **Lei 10.257 de 10 de julho de 2001 – Estatuto da Cidade** – Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.

BRASIL. **Norma Regulamentadora nº15**. NR15 – Dispõe sobre atividade ou operações insalubres. Ministério do Trabalho. Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho. 1978.

BRASIL. **Norma Regulamentadora nº17**. NR17 – Estabelece parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores. Ministério do Trabalho. Departamento de Segurança e Saúde no Trabalho. 1992.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. BSI. **BS 8233:2014 – Guidance on sound insulation and noise reduction for buildings**. London: British Standards Institution, 2014.

\_\_\_\_\_. **BS EN 60804:2001 – Integrating-averaging sound level meters**. London: British Standards Institution, 2001.

\_\_\_\_\_. **BS EN 61672-1:2013 – Electroacoustics – Sound level meters – Part 1: specifications**. London: British Standards Institution, 2013.

BRUAND, Y. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**. 4. ed. São Paulo: Perspectiva. 2005. 398p.

BRÜEL & KJAER. **Application Note: measuring speech intelligibility using DIRAC-Type 7841**. In: CATÁLOGO TÉCNICO, Chicago: Brüel & Kjaer Instruments, 2005.

CARBONI, M. H. S. **Qualidade acústica em salas de ensino de música: parâmetros acústicos preferenciais na opinião de professores de música**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba-PR – Brasil. 2012. Dissertação (Mestrado).

CARVALHO, Régio Paniago. **Acústica Arquitetônica**. 2 ed. Brasília: Thesaurus, 2010.

CAVALCANTI, A. **Instrumentos de gestão urbanística: limites e perspectivas de aplicação do Estudo de Impacto de Vizinhança (EIV)**. Dissertação (Mestrado) Dinâmicas do Espaço Habitado – DEHA – Grupo Dinâmicas do Espaço Habitado –

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU. Maceió-AL – Brasil. 2010. Dissertação (Mestrado).

CONAMA. Resolução 001/90. **Programa Nacional de Educação e Controle da Poluição Sonora – SILÊNCIO**. 08 de Março de 1990.

CONAMA. Resolução 002/90. **Programa Nacional de Educação e Controle da Poluição Sonora – SILÊNCIO**. 08 de Março de 1990.

CONETTA, R.; SHIELD, B.; COX, T.; MYDLARZ, C.; DOCKRELL, J.; CONNOLLY, D. **Acoustics of indoor sports halls and gymnasia**. Acoustics Bulletin, 2003, Vol. 37, Nº 4, p. 34-39.

COOPER, J. **Building a recording studio**. 5. ed. Los Angeles: Synergy Group, Inc., 1996. 209p.

DUARTE, E. A. C.; VIVEIROS E. B. Acoustic degradation of buildings along historical evolution of architecture: the construction of a timeline. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 18., 2004, Kyoto. **Proceedings...** Kyoto, 2004.

EGAN, M. D. **Architectural Acoustics Workbook**. Lincoln: The Robert Bradford Newman Student Award Fund, 2000. 244p.

ENGINEERING TOOLBOX. **Noise Rating Curve**. Disponível em: <[https://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d\\_60.html](https://www.engineeringtoolbox.com/nr-noise-rating-d_60.html)> Acesso em: 18 jan. 2018.

ERMANN, M. **Acoustics Illustrated**. New Jersey: Wiley, 2015.

EVEREST, F.A. **Master handbook of acoustics**. 4. ed. New York: Mc Graw Hill, 2001. 615p.

EVEREST, F.A.; POHLMANN, K.C. **Master handbook of acoustics**. 5. ed. New York: Mc Graw Hill, 2009. 510p.

FAHY, F. **Foundations of Engineering Acoustics**. London: Elsevier Academic Press, 2000, 443 p.

FAHY, F. **International Standards for the Determination of Sound Power Levels of Sources Using Sound Intensity Measurement: na Exposition.** Applied Acoustics, 1997, Vol. 50, Nº 2, p. 97-109.

FARINA, A. **Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique.** In: 108th AES Convention, Paris 18-22 February 2000. Disponível em: <<http://pcfarina.eng.unipr.it/Public/Papers/134-AES00.PDF>>. Acesso em: 5 nov. 2017.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos.** Bauru, São Paulo: UNESP. 2002. Disponível em: < [http://resgatebrasiliavirtual.com.br/moodle/file.php/1/E-book/Materiais\\_para\\_Download/Ruido/Apostila%20de%20Ruido%20I.pdf](http://resgatebrasiliavirtual.com.br/moodle/file.php/1/E-book/Materiais_para_Download/Ruido/Apostila%20de%20Ruido%20I.pdf)>. Acesso em: 5 nov. 2017.

FNDE – Fundo Nacional para o Desenvolvimento da Educação. **Infraestrutura física escolar.** Disponível em: <<http://www.fnde.gov.br/programas/par/eixos-de-atuacao/infraestrutura-fisica-escolar>> Acesso em: 18 mai. 2018

Gerges, S.N.Y. **Ruído: Fundamentos e Controle.** NR Consultoria e Treinamento: Florianópolis, 1992. 600 p.

HOPKINS, Carl. **Sound Insulation.** Slovenia: Elsevier Ltda, 2007. 622p.

ISO - International Organization for Standardization. **ISO 3382-1:** Acoustics — Measurement of room acoustic parameters – Part 1: Performance spaces. Geneva, Switzerland. 1ed. 2009. 34p.

\_\_\_\_\_. **ISO 3382-2:** Acoustics — Measurement of room acoustic parameters – Part 2: Reverberation time in ordinary rooms. Geneva, Switzerland. 1ed. 2008. 17p.

\_\_\_\_\_. **ISO 9613-2:** Acoustics – Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation", Geneva, Switzerland. 1ed. 1996. 24p.

\_\_\_\_\_. **ISO 16032:** Acoustics – Measurement of sound pressure level from service equipments in buildings – Engineering method. Geneva, Switzerland. 1ed. 2004. 19p.

\_\_\_\_\_. **ISO 16283-1**: Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. Geneva, Switzerland. 1ed. 2014. 43p.

\_\_\_\_\_. **ISO 18233**: Acoustics — Application of new measurement methods in building and room acoustics Geneva, Switzerland. 1ed. 2006. 26p.

JUSBRASIL. **Lei do silêncio: como lidar com vizinhos barulhentos**. Site JusBrasil. Publicação em 28.03.2015 Disponível em: <<https://carollinasalle.jusbrasil.com.br/noticias/177516982/lei-do-silencio-como-lidar-com-vizinhos-barulhentos>> Acesso em: 23 fev. 2018

KRAMER SCHALLTECHNIK GMBH; SONJA CHRISTIANSEN INFORMATIK GMBH. **Noise3D online manual**. Disponível em: < <http://www.noise3d.com/Release211/Calc/Manual/Manual.html>> Acesso em: 2 nov. 2017.

KUTTRUFF, H. **Acoustics: An introduction**. EUA: Taylor & Francis, 2007. 457p.

LONG. M. **Architectural Acoustics**. EUA: Elsevier Inc, 2006. 844p.

LORETO, V.; HAKLAY, M.; HOTH, A.; SERVEDIO, V.D.P.; STUMME, G.; THEUNIS, J.; TRIA, F. **Participatory Sensing, Opinions and Collective Awareness**. Switzerland: Springer, 2016. 405p.

MACEIÓ. Lei 5.486. **Plano Diretor Maceió - Alagoas**. Maceió, Alagoas, Brasil. 30 de Dezembro de 2005. Disponível em: <[http://sempla.maceio.al.gov.br/sempla/dpu/PLANO%20DIRETOR\\_MAPAS%20A3/PLAN O%20DIRETOR%202006\\_AT3.pdf](http://sempla.maceio.al.gov.br/sempla/dpu/PLANO%20DIRETOR_MAPAS%20A3/PLAN%20DIRETOR%202006_AT3.pdf)> Acesso em: 27 out. 2017.

MEC – Ministério da Educação. **Infraestrutura**. Disponível em: < <http://portal.mec.gov.br/expansao-da-rede-federal/195-secretarias-112877938/seb-educacao-basica-2007048997/18842-infraestrutura>> Acesso em: 18 mai. 2018.

MEHTA, M.; JOHNSON, J.; ROCAFORT, J. **Architectural acoustics: principles and design**. New Jersey: Courier Kendallville Inc., 1999. 446p.

MICHAELIS. **Dicionário on line.** Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/moderno-portugues/busca/portugues-brasileiro/>>. Acesso em: 8 mar. 2018.

MICHALSKI, R.L.X.N. **AUT 0278 – Desempenho Acústico, Arquitetura e Urbanismo – aulas.** Disponível em: <[http://www.fau.usp.br/disciplinas/desempenho-acustico-arquitetura-e-urbanismo/?drawer=aut0278\\*Aulas](http://www.fau.usp.br/disciplinas/desempenho-acustico-arquitetura-e-urbanismo/?drawer=aut0278*Aulas)> Acesso em: 25 out. 2017.

NEPOMUCENO, L. X. **Acústica Técnica.** São Paulo: ETEGIL, 1968.

NEUBAUER, O. R.; KANG, J. **A model based on loudness level to describe airborne sound insulation.** In: Internoise 2014, Melbourne 16-19 November 2014. Disponível em: < [http://ibn.de/wp-content/uploads/InterNoise\\_2014.pdf](http://ibn.de/wp-content/uploads/InterNoise_2014.pdf) >. Acesso em: 30 nov. 2017.

NEUFERT, E. **Arte de projetar em arquitetura.** 13. ed. São Paulo: Gustavo Gili do Brasil, 1998. 432p.

OITICICA, Maria Lucia Gondim da Rosa. **Desempenho acústico de diferentes tipologias de peitoris ventilados.** Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas/SP, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2010. 266p.

OLIVEIRA, P.L. **Habitar entre ruídos: Impactos sonoros provocados por tempolos na paisagem sonora do loteamento Village Campestre, Maceió-AL.** Dissertação (Mestrado) Dinâmicas do Espaço Habitado – DEHA – Grupo Dinâmicas do Espaço Habitado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU. Maceió-AL – Brasil. 2017. Dissertação (Mestrado).

PAIXÃO, Dinara Xavier da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA).** Tese de doutorado, Programa de pós-graduação em engenharia de produção, UFSC. Florianópolis. 2002. 182p.

PAIXÃO, D.X.; GERGES, S.N.Y. **Isolamento acústico: frequência crítica em alvenaria de tijolo maciço cerâmico.** In: I conferência latino-americana de

construção sustentável x encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo 18-21 julho, 2004.

PAULINO, E.T. **Estudo de impacto de vizinhança: alguns apontamentos a partir do caso de Londrina-PR**. Caderno Prudentino de Geografia, Presidente Prudente, n.33, v.2, p. 146-169, ago/dez, 2011.

PRESTES, V.B. **Plano diretor e Estudo de Impacto de Vizinhança**. Disponível em: <[http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu\\_doc/vanesca2-pd-eiv.pdf](http://lproweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/spm/usu_doc/vanesca2-pd-eiv.pdf)> Acesso em: 2 nov. 2017.

RIBEIRO, R. S.; CARDOSO, I. A.; SANTOS, L. C. A importância da acústica no processo de aprendizagem: diferentes estratégias de implementação. **ACÚSTICA**, Coimbra, Portugal, out. 2008. Disponível em: <<http://www.sea-acustica.es/Coimbra08/id234.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

RODRIGUES, C.E. **Caracterização acústica de ginásios de esportes multifuncionais da cidade de Campinas, SP**. 2008, 160p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

ROOM EQ WIZARD. **Manual Versão 5.19**. Disponível em: <[http://www.roomeqwizard.com/rewv5\\_help.pdf](http://www.roomeqwizard.com/rewv5_help.pdf)>. Acesso em: 31 out. 2017.

SAYEGH, S.. **Equipamentos públicos: ginásio poliesportivo**. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/3/artigo215298-3.aspx>>. Mai. 2011. Acesso em: 31 jan. 2018.

SENADO FEDERAL. **Invisível, poluição sonora cresce e se agrava**. Jornal do Senado. Publicação em 19.06.2012. Disponível em: <<http://www12.senado.gov.br/jornal/edicoes/2012/06/19/invisivel-poluicao-sonora-cresce-e-se-agrava>>. Acesso em: 21 mai. 2017.

SIMONS, M.W.; WATERS, J.R. **Sound Control in Buildings: A Guide to part E of the Building Regulations**. 1 ed. New Jersey: Blackwell Publishing, 2004. 167p.

SINDUSCON. **NBR 15.575: Construção está mais madura, mas obstáculos persistem**. Sinduscon SP. Publicação em 19.06.2015. Disponível em: <

<https://www.sindusconsp.com.br/nbr-15575-construcao-esta-mais-madura-mas-obstaculos-persistem/>>. Acesso em: 26 jan. 2018.

SOBRAC. **NBR 10152:2017 é publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas**. News – Site da Sociedade Brasileira de Acústica. Publicação em 29.11.2017. Disponível em: <<http://acustica.org.br/2017/11/nbr-101522017-e-publicada-pela-associacao-brasileira-de-normas-tecnicas/>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

SPORTS ENGLAND. **Sports Halls Design & Layouts: Updated & Combined Guidance**. 1 ed. London: Sport England, 2012. 54p.

SILVA, J.T. **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) Dinâmicas do Espaço Habitado – DEHA – Grupo Dinâmicas do Espaço Habitado – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – FAU. Maceió-AL – Brasil. 2014. Dissertação (Mestrado).

VALLE, S. do. **Manual prático de acústica**. 1 ed. Rio de Janeiro: Música & Tecnologia, 2006. 376p.

Vorländer, Michael. **Auralization: Fundamentals of acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality**. 1. ed. Berlin: Springer, 2008. 335p.

WHO – World Health Organization. **Occupational noise**. Protection of the Human Environment, Geneva, 2004. Disponível em: <[http://www.who.int/quantifying\\_ehimpacts/publications/en/ebd9.pdf?ua=1](http://www.who.int/quantifying_ehimpacts/publications/en/ebd9.pdf?ua=1)> Acesso em: 27 de jul. 2017.

WHO – World Health Organization. **Occupational exposure to noise: Evaluation, prevention and control**. Geneva, 1995. Disponível em: <[http://www.who.int/occupational\\_health/publications/noise.pdf](http://www.who.int/occupational_health/publications/noise.pdf)> Acesso em: 27 de jul. 2017.

## APÊNDICE 1 – FUNDAMENTOS DE ACÚSTICA

Diversos autores afirmam que som é o resultado do movimento das moléculas de ar geradas por fonte emissora capazes de serem percebidas pelo ouvido humano, entretanto, Bistafa (2011) aprofundou o conceito e definiu que “o termo *som* tem uma conotação mais ampla, já que se refere [...] a tudo aquilo que é governado por princípio físico análogo. Assim, perturbações em frequências muito baixas (*infrassons*) ou muito elevadas (*ultrassons*), que não são ouvidas por uma pessoa com audição comum, são também consideradas como sons”. Ou seja, as ondas sonoras estão em uma gama acima e abaixo do que se pode captar pelo aparelho auditivo do homem.

O sentido da audição é fundamental para a noção de espacialidade e orientação de humanos e animais. Isso contribui para o reconhecimento de características do ambiente em que o ouvinte está inserido, como as suas dimensões e proximidade de objetos existentes no recinto, como também garante a comunicação dentro do mesmo (FAHY, 2000).

Entretanto, é comum encontrar situações em que as características acústicas de edificações são relegadas em função de seus aspectos visuais. As consequências da desatenção de projetistas e construtores às propriedades acústicas de um ambiente geram conflitos após sua ocupação e seu funcionamento, afetando a qualidade do desempenho das atividades realizadas pelos usuários desse espaço.

Para avaliar corretamente as propriedades acústicas de um ambiente, é importante a compreensão do conceito e de cada uma das características físicas do som para o entendimento de todos os fenômenos acústicos dentro de qualquer edificação ou fora dela. Através desses estudos e análises, desenvolvem-se sistemas capazes de adequar acusticamente qualquer espaço de acordo com as atividades a que se destinarem.

No que se refere a economia de obra, quando um projeto recebe um adequado planejamento em acústica, o custo não ultrapassa 3% do valor total da edificação. Por outro lado, para corrigir um ambiente já construído com deficiências em acústica, o custo de intervenção é ainda maior, ultrapassando 10% do custo total da obra e com desempenho acústico inferior se comparado à situação recomendada inicialmente (NEPOMUCENO, 1968).

### A1.1. Conceitos físicos do som

O movimento da onda sonora possui natureza mecânica e mesmo que o presente trabalho tome como referência principal os estudos do comportamento sonoro no ar, é pertinente deixar claro que em meios físicos distintos esse tipo de onda possui diferentes denominações. Segundo Valle (2006), esse estímulo é chamado:

- Nos corpos sólidos: VIBRAÇÃO;
- No ar: SOM;
- Nos circuitos elétricos: SINAL DE ÁUDIO.

Antes de ampliar a análise do comportamento sonoro no ambiente construído considerando os campos livre e reverberante, é importante visitar os conceitos físicos e introdutórios que norteiam tais relações. Para isso, a teoria do comportamento acústico considera o som em situações ideais de propagação para, a partir daí, ser feito o aprofundamento teórico capaz de considerar situações reais.

#### A1.1.1. Impedância acústica

O conceito físico de impedância, que é a medição da resistência do meio de propagação ao movimento de partículas em um dado ponto (LONG, 2006) baseia as propriedades acústicas de um ambiente e facilita a compreensão do comportamento sonoro em qualquer situação.

Dessa forma, a relação entre essas partículas e o meio funcionam como uma rede que relaciona a pressão do fluido (ar, por exemplo) e sua velocidade nesse meio, chamado de admitância (FAHY, 2000). Um exemplo comparativo: a impedância do som em uma barra de metal é maior que a impedância do som no ar.

$$Z = \frac{P}{u} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde:

$z$  = impedância acústica específica (N s /m<sup>3</sup>);

$P$  = pressão sonora (Pa = N/m<sup>2</sup>);

$u$  = velocidade acústica da partícula (m /s).

Entretanto, esse conceito é introdutório e considera uma situação ideal, onde apenas o movimento linear das partículas é levado em conta. Ao tomar como exemplo o ar na natureza, a propagação do som nesse meio se dá de maneira omnidirecional, tornando a abordagem matemática mais complexa.

### **A1.1.2. Intensidade, pressão e diretividade sonora**

Numa relação entre fonte sonora (emissor) e receptor (ouvinte), Ermann (2015) resume a interação: potência sonora ( $W$ ) é a grandeza relacionada à emissão do som (fonte sonora); intensidade sonora ( $I$ ) e pressão sonora ( $P$ ) são grandezas relacionadas à força que o som chega ao receptor (microfone, aparelho auditivo).

O produto entre pressão sonora, que é uma grandeza escalar, e a velocidade da partícula no meio, que é o vetor definidor da direção e do sentido da mesma, é a intensidade sonora, caracterizada pelo fluxo da energia sonora por unidade de área.

Dessa forma, a Intensidade é um vetor indicando a direção da propagação do som e a quantidade de energia contida nele em um determinado período. Em um meio de propagação ideal, a intensidade sonora máxima ocorre quando a direção do vetor coincide com a normal da superfície plana (KUTTRUFF, 2007).

$$I = P \cdot u \quad \text{(Equação 6)}$$

Onde:

$I$  = Intensidade sonora máxima ( $W / m^2$ );

$P$  = pressão sonora ( $Pa = N/m^2$ );

$u$  = velocidade da partícula ( $m / s$ ).

Considerando o ar como meio de propagação do som emitido por uma fonte sonora pontual e o comportamento omnidirecional da distribuição das partículas no campo livre, a intensidade é inversamente proporcional ao quadrado da distância da fonte sonora (EVEREST; POHLMANN, 2009). Tem-se, portanto, a seguinte relação:

$$I = \frac{W}{4\pi r^2} \quad \text{(Equação 7)}$$

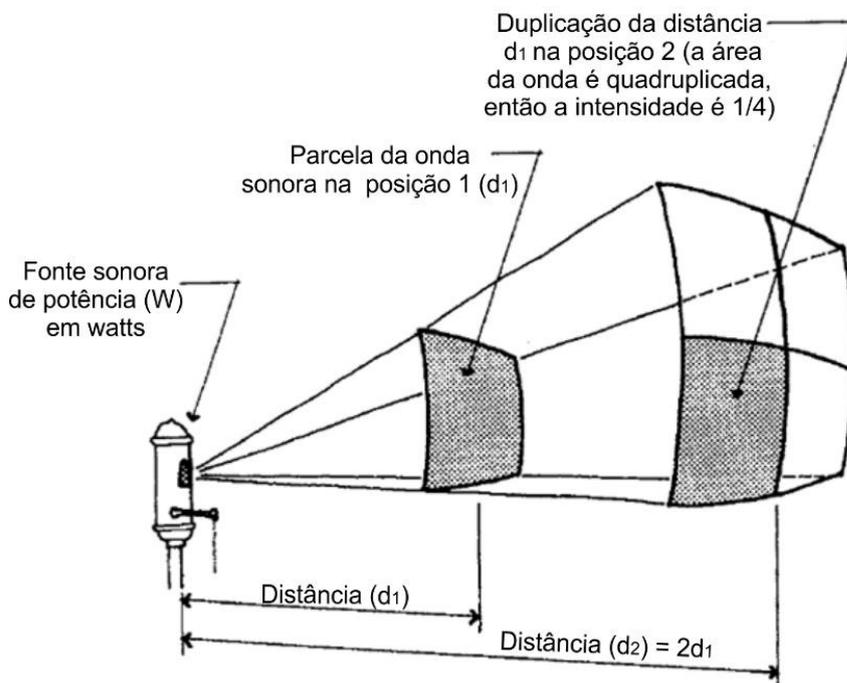
Onde:

$I$  = Intensidade sonora por unidade de área ( $W / m^2$ );

$W$  = potência da fonte sonora ( $W = J/s$ );

$r$  = distância da fonte (m).

**Figura 62:** Propagação do som.



Fonte: adaptado de Egan (2009).

Valle (2006) mostra que para o receptor ouvir o “dobro do som” é necessária uma potência ( $W$ ) 10 vezes maior. Então, para uma melhor compreensão numérica dessas grandezas e pelo fato dos valores obtidos serem muito baixos, convencionou-se utilizar o logaritmo na base 10 e o *decibel* como unidade de medida. Assim NIS (Nível de Intensidade Sonora) é dado por:

$$NIS = 10 \log \frac{I^2}{I_0^2} dB \quad (\text{Equação 8})$$

Onde:

NIS = Nível de intensidade sonora, (dB - *decibels*);

$I$  = intensidade sonora, ( $W/m^2$ );

$I_0$  = pressão sonora de referência ( $W/m^2$ ) =  $10^{-12} W/m^2$ .

Long (2006) afirma que a intensidade sonora é proporcional ao quadrado da pressão sonora e, por isso, ambos os valores (a grandeza escalar) de NPS e NIS são idênticos (em dB). Everest e Pohlmann (2009) mostram que a intensidade sonora é

difícil de medir e que o conceito de nível pressão sonora – NPS (ou SPL, do inglês *Sound Pressure Level*) é o parâmetro mais acessível para a medição acústica, sendo representado pela seguinte fórmula:

$$\text{NPS} = 10 \log \frac{P^2}{P_0^2} = 20 \log \frac{P}{20 \mu\text{Pa}} \text{ dB} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

NPS = Nível de pressão sonora, (dB - *decibels*);

$P$  = pressão sonora, ( $\mu\text{Pa}$  ou  $\text{N/m}^2$ );

$P_{\text{ref}}$  = pressão sonora de referência ( $\mu\text{Pa}$  ou  $\text{N/m}^2$ ) =  $20\mu\text{Pa}$  ou  $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ .

Considerando apenas o som no campo livre e em situação ideal, a cada duplicação da distância da fonte sonora o NPS cai 6dB. Isso mostra que a pressão sonora é inversamente proporcional à distância da fonte, seguindo então a chamada “lei do inverso da distância” (EVEREST; POHLMANN, 2009). A figura 61, a seguir, mostra essa relação teórica.

$$P = \frac{k}{r} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

$P$  = pressão sonora, ( $\mu\text{Pa}$  ou  $\text{N/m}^2$ );

$k$  = constante;

$r$  = raio de distância da fonte sonora (m).

Quando o  $\text{NPS}_1$  (também pode ser representado como  $L$ , do inglês “*Level*”) a uma distância  $r_1$  é conhecido, é possível calcular o  $\text{NPS}_2$  em outra distância  $r_2$ , através da seguinte fórmula:

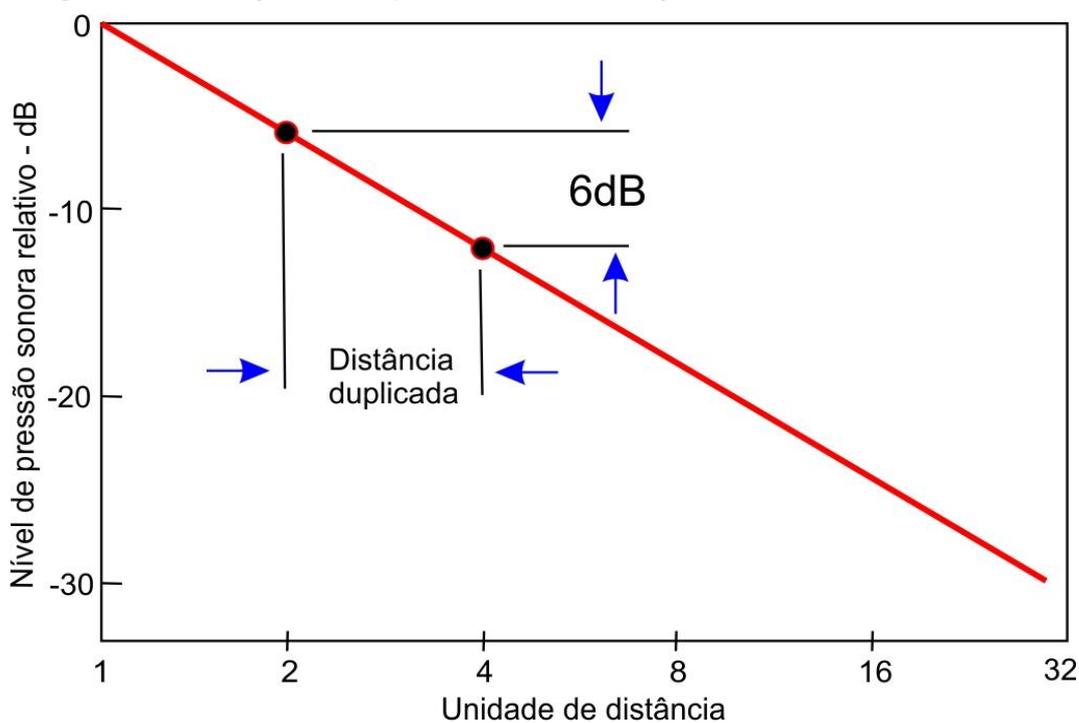
$$L_2 = L_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1} \text{ dB} \quad (\text{Equação 11})$$

Entretanto, em ambientes fechados comuns, as reflexões sonoras no interior desses locais impedem que o som diminua 6dB com o dobro da distância, afinal, o

campo livre só existe de forma plena em situações anecóicas. Da mesma forma que em ambientes perfeitamente reverberantes o NPS é igual em todos os seus pontos, situação também só encontrada em laboratórios e situações ideais na teoria do campo da física (EVEREST; POHLMANN, 2009).

Portanto, por conta da indissociabilidade entre os campos livre e reverberante já explicada anteriormente, a figura 63 mostra que, em construções comuns, o NPS gerado por uma fonte a uma certa distância é amplificado por conta do campo reverberante, causando a percepção de que o som ali produzido é mais intenso do que realmente é.

**Figura 63:** Atenuação do campo sonoro livre em função da distância da fonte sonora.

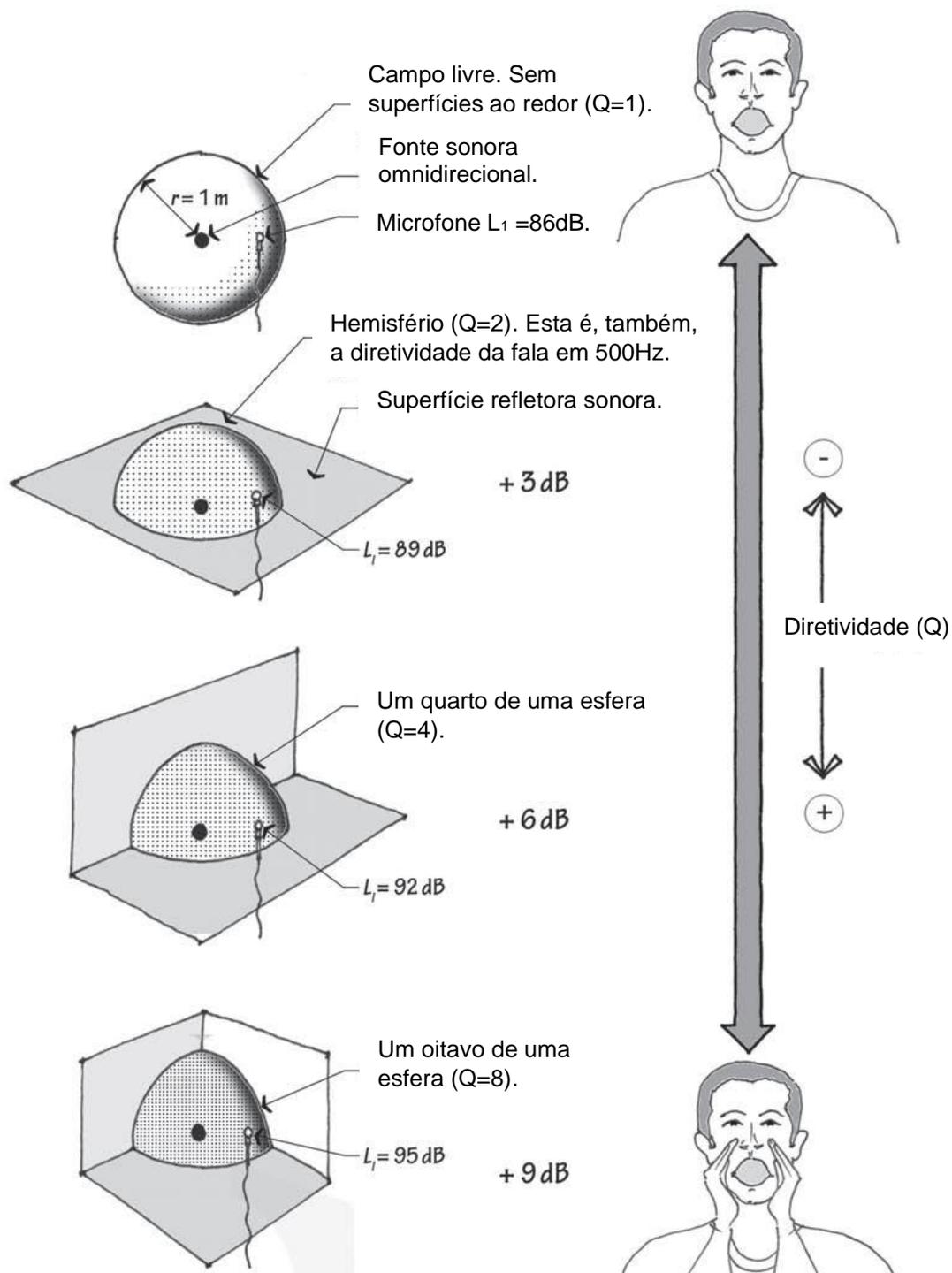


Fonte: adaptado de Everest; Pohlmann (2009).

Outro fator que impede que o som diminua 6dB com o dobro da distância em uma situação real dentro de um ambiente fechado está relacionado à diretividade sonora (Q) ocasionada pelos obstáculos que rodeiam as fontes sonoras em todas as situações na natureza. Tomando como exemplo a propagação do som em um campo aberto, o som não se propaga de forma esférica, mas semi-esférica.

Afinal, para que o som se propagasse em plenitude de forma esférica, o ambiente não deveria possuir nenhum tipo de obstáculo ou fechamento próximo de seu gerador. A figura 64, a seguir, mostra a amplificação do NPS em função de Q.

**Figura 64:** NPS e a relação com a diretividade (Q) da fonte sonora em situação real.

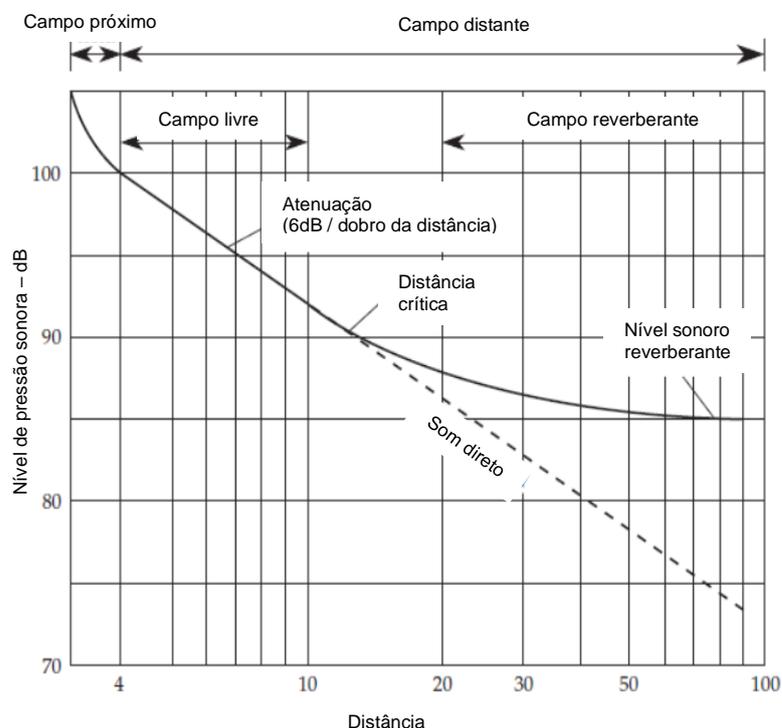


Fonte: adaptado de Ermann (2015).

Dessa forma, ao ligar um alto-falante ao ar livre com um NPS qualquer, por se tratar de um campo semi-esférico de propagação sonora, o nível de pressão sonora já iniciaria 3dB mais intenso que em um ambiente de campo perfeito de propagação esférica. Daí, com o dobro da distância, a queda de NPS medida seria entre 4 ou 5 dB, não 6dB como a teoria da situação ideal indica.

A figura 65 apresenta, teoricamente, que o campo livre próximo à fonte continua respeitando a “lei do inverso da distância”, diminuindo 6dB a cada duplicação da distância da fonte sonora.

**Figura 65:** NPS e a relação entre os campos livre e reverberante.



Fonte: adaptado de Everest; Pohlmann (2009).

Entretanto, a distância crítica, ainda na figura 65, indica o momento em que o NPS do campo livre se iguala ao NPS do campo reverberante, assinalando o início da ação das reflexões do recinto no resultado da medição dessa energia acústica. A alteração do NPS original através das reflexões internas no ambiente construído analisado é resultado desse estímulo na amplificação do som emitido pela fonte.

### A1.1.3. Níveis sonoros, frequência e percepção do sistema auditivo humano

Long (2006) esclarece que o NPS é o indicador mais comum para a compreensão da força de uma onda sonora captada por um sistema receptor, que pode ser equipamento de medição (microfone, sonômetro), ou o sistema auditivo. Com uso de equipamentos específicos, é possível medi-lo e quantificá-lo.

Ao relacionar os valores de NPS de referência captados pelos receptores, é importante também conhecer os valores de potência sonora (W) emitidos pelas fontes

de ruído (figura 66). Essa relação está presente em diversos cálculos acústicos, inclusive na fórmula de redução de ruído por absorção sonora.

**Figura 66:** Valores de potência sonora de fontes e níveis de pressão sonora captados por equipamentos de medição e sistema auditivo.

<b>EMISSOR</b>			<b>RECEPTOR</b>		
<b>POTÊNCIA</b> (Watts)	<b>NÍVEL DE POTÊNCIA</b> (dB ref $10^{-12}$ Watts)	<b>FONTE</b>	<b>A uma dada distância</b>	<b>dB(A)</b> 20 $\mu$ N/m <sup>2</sup>	<b>Ambiente</b>
25 a 40 milhões	195	Foguetes espaciais		140	
			Sirene de 50HP	130	
			Decolagem de jato	120	
100.000	170	Turbinas de aviões a jato		110	Área de transformadores
10.000	160		Rebitadeira	110	
1.000	150		Serra de corte	100	Área de fornos elétricos
100	140	Avião de com 4 propulsores	Fábrica de tecelagem	90	Sala de caldeira
10	130	Orquestra de 75 integrantes	Metrô	90	Gráfica
1	120	Órgão tradicional	Martelo	80	
		Motor de avião de pequeno porte	Caminhão pesado	80	
		Grande talhadeira	Trem de carga	70	Área próxima a autoestrada
0	110	Rádio em voz alta	Aspirador de pó	70	Dentro de um carro a 80km/h
		Ventilador centrífugo (13000 CFM)	Voz - Nível de conversação	60	Grande loja
0,1	100	Automóveis em rodovia		50	Tráfego leve
0,01	90	Ventilador Vane-Axial (1500 CFM)	Grande transformador (200W)	50	Exterior de área residencial
0,001	80	Voz - Grito		40	Níveis mínimos para áreas residenciais em Chicago à noite.
0,00001	70	Voz - Nível de conversação		30	Escritório privado
0,000001	60		Voz - Sussuro muito suave	30	Estúdio para efeitos sonoros
0,0000001	50			20	Estúdio para voz
0,00000001	40			10	
0,000000001	30	Voz - Sussuro muito suave	Limiar da audição	0	

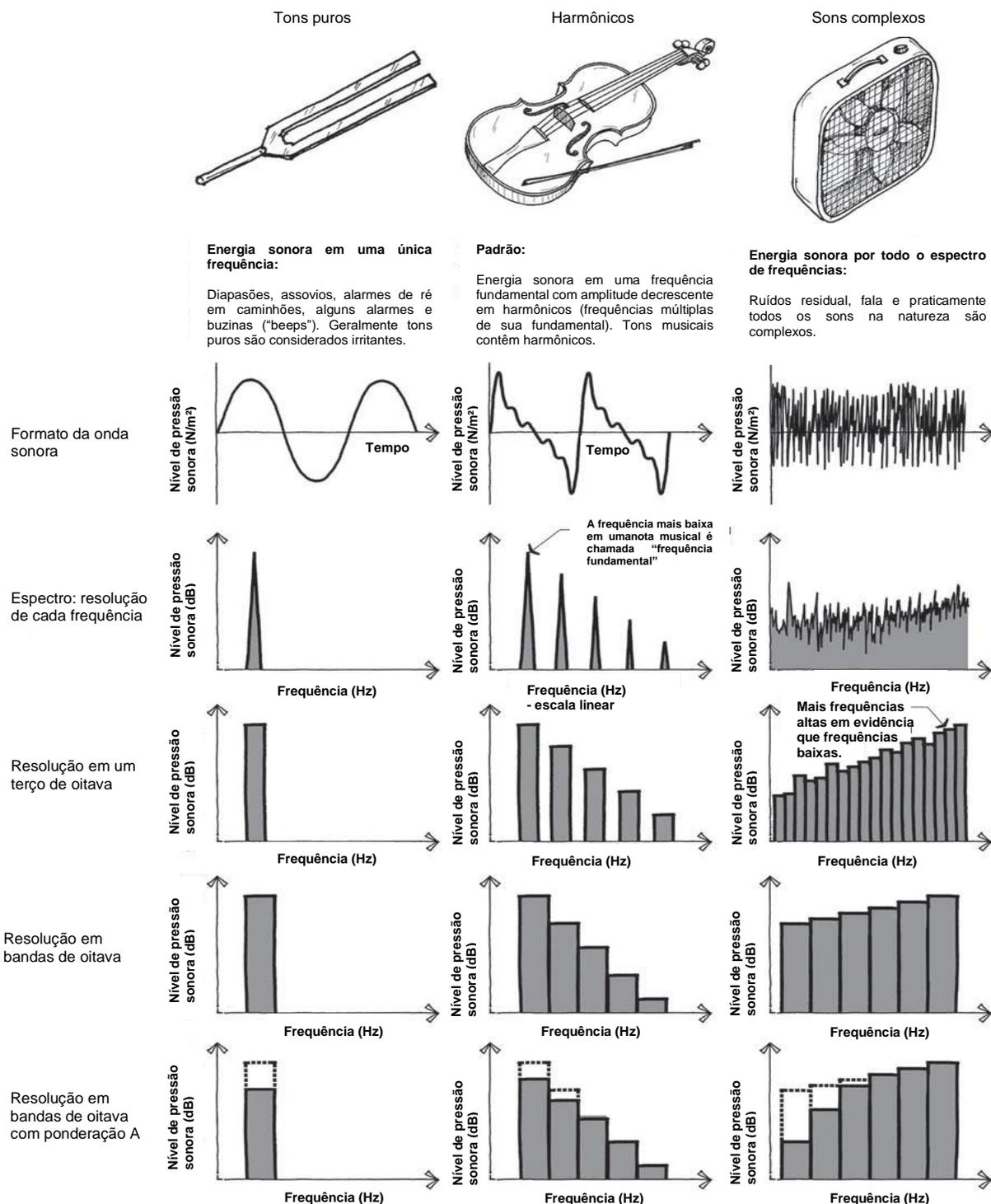
Fonte: adaptado de Long (2006).

Daí a importância do arquiteto / projetista em comparar os dados expostos em tabelas, obtidos por equipamentos de medição acústica, com as situações reais para aguçar a percepção sonora e buscar soluções adequadas em projeto, pois os equipamentos não substituem a sensibilidade do projetista.

Esses equipamentos de medição geram gráficos de análise espectral acústica para ilustrar o comportamento sonoro em diversas situações. Esses gráficos relacionam pressão sonora em função do tempo e pressão sonora em função da frequência. Para cada tipo de som, o gráfico responde de maneira específica.

Segundo Cooper (1996), “a maioria dos sons são mais complexos e emitem dúzias de frequências em uma emissão”. Por exemplo, ao falar, o ser humano trabalha toda uma gama de frequências, pois o som das vogais estão alocados em diferentes regiões das frequências baixas, enquanto consoantes estão na região aguda (MEHTA *et al*, 1999).

**Figura 67:** Gráficos de análise espectral acústica.



Fonte: adaptado de Ermann (2015).

Há diversas ferramentas desenvolvidas para a análise do som. A mais utilizada em instrumentos de medição acústica é a do gráfico de espectro de frequências, onde “as frequências audíveis são apresentadas, da esquerda para a direita, no eixo horizontal” (COOPER, 1996).

A pressão sonora de cada frequência em particular é medida no eixo vertical. Uma vez que milhares de frequências não podem ser listadas individualmente em um único diagrama, uma escala comprimida, conhecida como escala logarítmica, separa as frequências em bandas para análise acústica. “Essa divisão ocorre em bandas de oitava ou terços de oitava” (COOPER, 1996).

As bandas de frequências em oitava citadas pelo autor são: 16,5Hz, 31,5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz, 8000 Hz, 16000 Hz. Elas norteiam a interpretação dos fenômenos acústicos registrados no gráfico de espectro de frequências.

Entretanto, os gráficos não são capazes de representar as especificidades da natureza do som, como seu timbre, por exemplo. Muito embora, a partir do exemplo da figura 65, pode-se inferir que para cada tipo de som há uma faixa de frequências em que suas características peculiares se sobressaem.

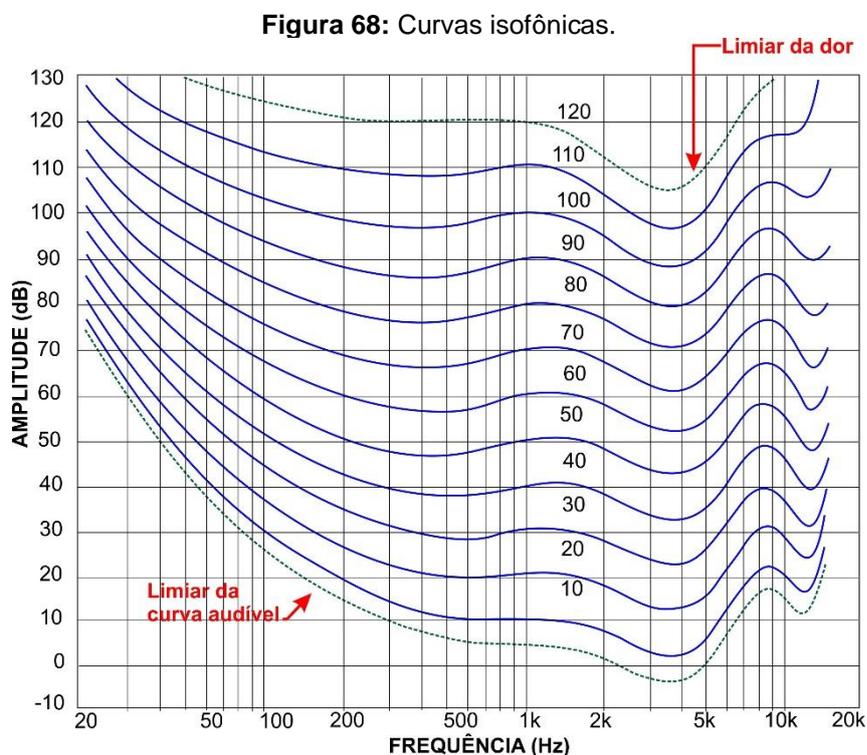
Hopkins (2007) explica que o alcance da percepção da audição humana vai de 20Hz a 20kHz, mas define que o estudo acústico do ambiente construído deve abranger a faixa de frequências de 50Hz a 5kHz em bandas de terço de oitava. Convém separar as frequências em três grupos:

- Graves, ou baixas: 20Hz a 200Hz;
- Médios: 200Hz a 6kHz;
- Agudos ou altas: 6kHz a 20kHz.

A região dos médios é muito ampla, sendo subdividida em “médios graves (200Hz a 600Hz), médios (600Hz a 2kHz) e médios agudos (2kHz a 6kHz)” (VALLE, 2006).

As curvas isofônicas, apresentadas na figura 68 a seguir, representam a resposta do ouvido humano às frequências sonoras em função da amplitude. Pode-se concluir, então, que o aparelho auditivo do homem não percebe o som de forma equilibrada.

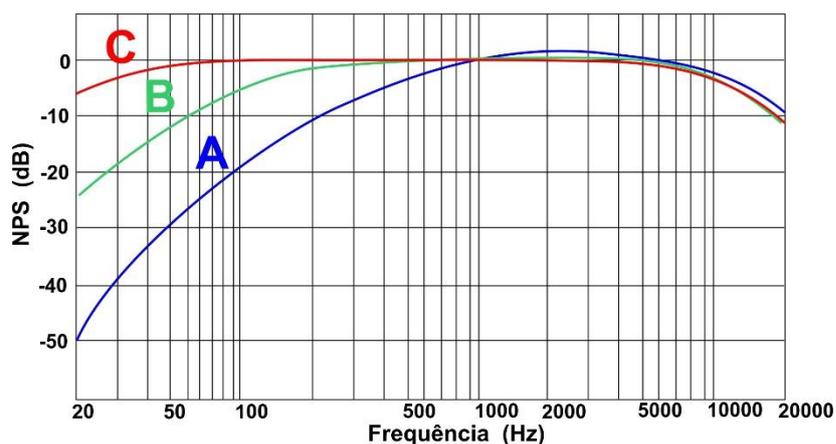
A região dos agudos é desnivelada (mais sensível) e a percepção da região grave depende muito da capacidade de amplitude da fonte sonora nessa faixa específica por ser menos sensível. O princípio de interpretação que baseia esse gráfico é o mesmo que o do gráfico de análise espectral acústica (MEHTA *et al*, 1999) já mostrada na figura 67, anteriormente.



Fonte: adaptado de Mehta *et al* (1999).

A resposta do ouvido humano dada às frequências possui uma variação não-linear. Por isso, o filtro de ponderação A tem o objetivo de associar os valores de NPS da energia sonora pura às características das curvas isofônicas.

**Figura 69:** Curvas dos filtros de ponderação sonora por frequência mais utilizadas.

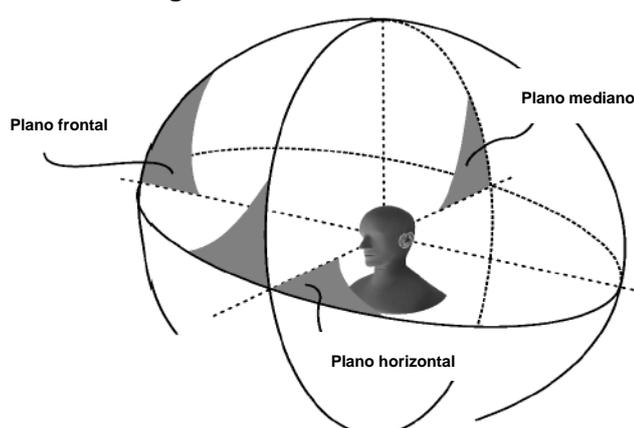


Fonte: adaptado de Kuttruff (2007).

Dessa forma, ao captar níveis de pressão sonora, os sonômetros podem apresentar os valores em dB(A) para avaliação de conforto acústico do ser humano. Outras curvas de ponderação são voltadas para determinados usos. A ponderação C é usada para avaliar a presença de sons de baixa frequência; a ponderação B está em desuso. Há outras curvas: a curva G é usada para medir infrassons, a letra Z, ou simplesmente “dB”, indica que filtros de ponderação não estão sendo aplicados, para medição de energia acústica plena (EVEREST, 2001).

De acordo com Vorländer (2008), humanos localizam o som através da escuta binaural (no campo do áudio, conhecida como estéreo), por dois receptores localizados em cada lado da cabeça: os ouvidos. O sistema auditivo humano é capaz de perceber os sons vindos não somente dos lados, como também de frente, de cima e de trás, pois o cérebro interpreta os sinais vindos de ambos os ouvidos como um sistema monaural, caracterizado como planos de escuta: plano frontal, horizontal e mediano, apresentados na figura 70.

**Figura 70:** Planos de escuta.



Fonte: adaptado de Vorländer (2008).

Além dos limites de frequência, há os limites de amplitude que o aparelho auditivo do homem é capaz de suportar. O ouvido humano só identifica claramente as variações de amplitude na ordem de 3dB com limite mínimo de 10dB para começar a ouvir algumas frequências altas e o máximo de 120dB para suportar a pressão sonora na região dos médios e graves (BISTAFA, 2011).

A região aguda, mais sensível, é suportada em pouco mais de 100dB. Mehta et al (1999) elucida a questão das alterações nos níveis de ruído e a percepção humana. Destaca que a assimilação do ruído somente se torna clara após um

acréscimo de 5 dB(A) (*decibels* ponderados em A) sobre o ruído de referência, o que pode ser constatado na figura 69, a seguir.

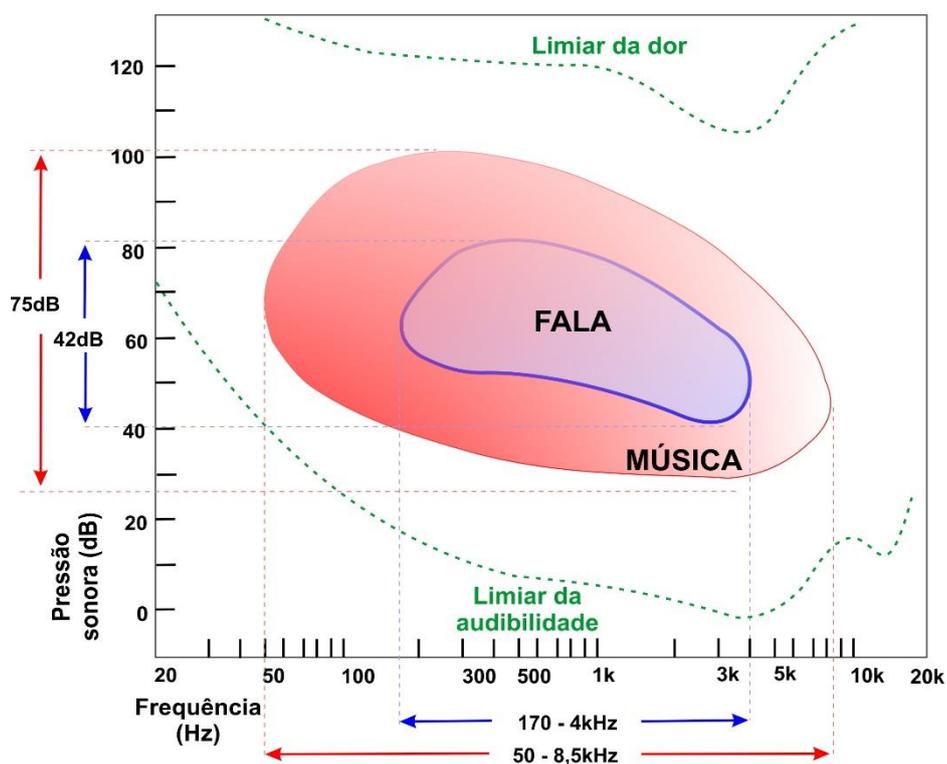
**Figura 71:** Variação de NPS, potência e percepção do sistema auditivo humano.

Varição de NPS	Varição de potência	Sensação
Menos de 1dB	Menos de 1,26 vez	Imperceptível
1dB	1,26 vez	Mínimo perceptível com tom constante
2dB a 3dB	De 1,6 a 2 vezes	Mínimo perceptível com música
6dB	4 vezes	Perfeitamente perceptível
10dB	10 vezes	Boa variação
25dB	320 vezes	Varição muito forte
60dB	1 milhão de vezes	Praticamente deixa-se de ouvir
120dB	1 trilhão de vezes	Gama total do ouvido

Fonte: adaptado de Valle (2006).

Na prática, de acordo com a figura 72 a seguir, a voz humana opera em uma faixa 170Hz e 4000Hz, com variação de amplitude (pressão sonora) de 42dB com limite mínimo em 40dB e máximo em 82dB. Para música, a faixa comum que compreende sua audibilidade é ampliada para uma faixa de 50Hz a 8,5kHz, admitindo variação de amplitude entre 28dB (mínimo) a 103dB (máximo) (EVEREST, 2001). Todos esses dados são médias considerando um ser humano comum.

**Figura 72:** Faixa de atuação de frequências e amplitude da fala humana e da música.



Fonte: adaptado de Everest (2001).

Por outro lado, para buscar uma aproximação pragmática a ser definida em normas e leis, as aplicações dos estudos em acústica são resumidas e quantificadas em escalas lineares e globais, como o *decibel* (dB), o que faz com que o som seja tratado meramente como um valor numérico sem considerar suas particularidades qualitativas, como seu timbre e seu movimento (VORLÄNDER, 2008).

Isso evidencia que os estudos, o desenvolvimento de métodos e as análises a respeito do comportamento do som nos ambientes possuem um grande potencial de evolução e amadurecimento. Uma vez que os conceitos físicos foram apresentados, é importante conhecer os parâmetros que norteiam as aplicações dos mesmos.

### **A1.2. Controle de ruído no ambiente construído**

Um dos objetivos dos estudos de acústica arquitetônica é minimizar e proteger o homem das influências negativas dos fenômenos sonoros prejudiciais à saúde através da aplicação de materiais que cumpram essa função no ambiente construído (WHO, 1995). A Organização Mundial da Saúde (OMS, ou WHO, do inglês *World Health Organization*) lista algumas doenças sofridas em consequência do ruído no campo de trabalho: incômodo, hipertensão, distúrbio do bem-estar psicossocial e problemas psiquiátricos (WHO, 2004).

Para avaliar as características acústicas de um ambiente, parâmetros de condicionamento e isolamento acústicos foram desenvolvidos para avaliar o grau de intervenção construtiva em um local para serem alcançados níveis que atendam às exigências de saúde e conforto aos usuários. Os valores dos parâmetros são obtidos através de (BRANDÃO, 2016):

- Acústica Estatística – Cálculos estatísticos com dados de materiais obtidos em testes laboratoriais e dados dimensionais do recinto analisado;
- Medições acústicas *in situ* – Dados empíricos através de medições acústicas onde é possível entender as características acústicas do ambiente real;
- Acústica Geométrica – simulações computacionais do comportamento sonoro em salas, considerando a geometria do ambiente e as características dos materiais empregados nela. As simulações computacionais são aplicáveis também na predição do isolamento acústico e ruído urbano.

Não obstante, quando o foco da intervenção acústica em uma construção (ou em uma pesquisa) é o isolamento, apenas parâmetros de isolamento acústico são levantados; quando o foco do trabalho é condicionamento, apenas parâmetros de condicionamento acústico são considerados. Foca-se nos parâmetros a tal ponto, que negligencia-se o contexto geral e os fenômenos sonoros que podem ocorrer como um todo (ERMANN, 2015).

A maior causa disso é justamente o grande volume de dados e conceitos para gerenciar, por isso é importante frisar que os fenômenos sonoros são determinísticos (FAHY, 1997), ou seja, uma série de fatores estão inter-relacionados e, dessa forma, o isolamento e o condicionamento acústicos são indissociáveis em uma análise detalhada e completa do desempenho acústico das edificações.

Diante disso, Gerges (1992) defende que um ambiente isolado e não condicionado perde eficiência em todos os parâmetros acústicos se o mesmo tivesse isolamento e condicionamento, concomitantemente. Daí uma forte evidência que indica a relação entre condicionamento e isolamento acústicos, mostrando que um ambiente condicionado acusticamente pode contribuir na eficácia do isolamento acústico.

#### **A1.2.1. Parâmetros de condicionamento acústico**

A absorção sonora e o tempo de reverberação serão os parâmetros de condicionamento acústico adotados para avaliação do campo sonoro difuso do objeto de estudo desta dissertação, pois tais parâmetros estão intimamente conectados à sensação de espacialidade e percepção de privacidade de qualquer recinto (ISO, 2008). A partir daí, é possível entender as características dos materiais acústicos a serem inseridos e a quantidade de absorção necessária para cada tipo de ambiente. Todos esses parâmetros estão inter-relacionados matematicamente e serão esclarecidos a seguir.

##### **a) Absorção total (A) e índice médio de absorção ( $\bar{\alpha}$ )**

Materiais de qualquer tipo possuem coeficiente de absorção acústica (também denominado *alfa*,  $\alpha$ ), compreendido como a capacidade de absorver ou refletir a onda sonora. Esse coeficiente é definido por porcentagem, e seus valores vão de 0 a 1.



Segundo Valle (2006), o valor de “ $\bar{\alpha}$ ” segue o mesmo conceito que o do coeficiente de absorção de materiais apresentado na figura 73, mas é aplicado no ponto de vista da sala. “Índices acima de 40% significam salas ‘mortas’ (pouco reverberantes), de 40% a 20%, salas ‘médias’ (com reverberação considerável) e abaixo de 20% significam salas ‘vivas’ (muito reverberantes)”.

### **b) Tempo de Reverberação (TR) – Equação de Sabine e de Eyring**

O tempo de reverberação é caracterizado como o período em que o som emitido em um instante inicial ( $T_0$ ) leva para decair 60dB ( $T_f$  – instante final). A reverberação é comumente percebida em banheiros, corredores, ou seja, locais vazios com materiais de baixo coeficiente de absorção sonora (MEHTA et al., 1999).

O TR pode ser obtido através de cálculos e através de medições acústicas. O físico americano Wallace Sabine relacionou a capacidade de absorção sonora de salas com seu volume em estudo empírico no anfiteatro do Fogg Art Museum (RIBEIRO, CARDOSO & SANTOS, 2008).

Aplicando-se uma constante de multiplicação na equação 14, chega-se ao tempo (em segundos) que uma determinada banda de frequência leva para decair 60dB em um ambiente. As nomenclaturas para o tempo de reverberação podem ser: T, ou TR, TR60 ou RT60 (do inglês, *reverberation time*).

$$TR = \frac{0,161 \cdot V}{\sum S \alpha} \text{ segundos} \quad (\text{Equação 14})$$

Onde:

0,161 – constante de multiplicação;

V – Volume da sala ( $m^3$ );

$\sum S$  – Somatório das áreas das superfícies ( $m^2$ );

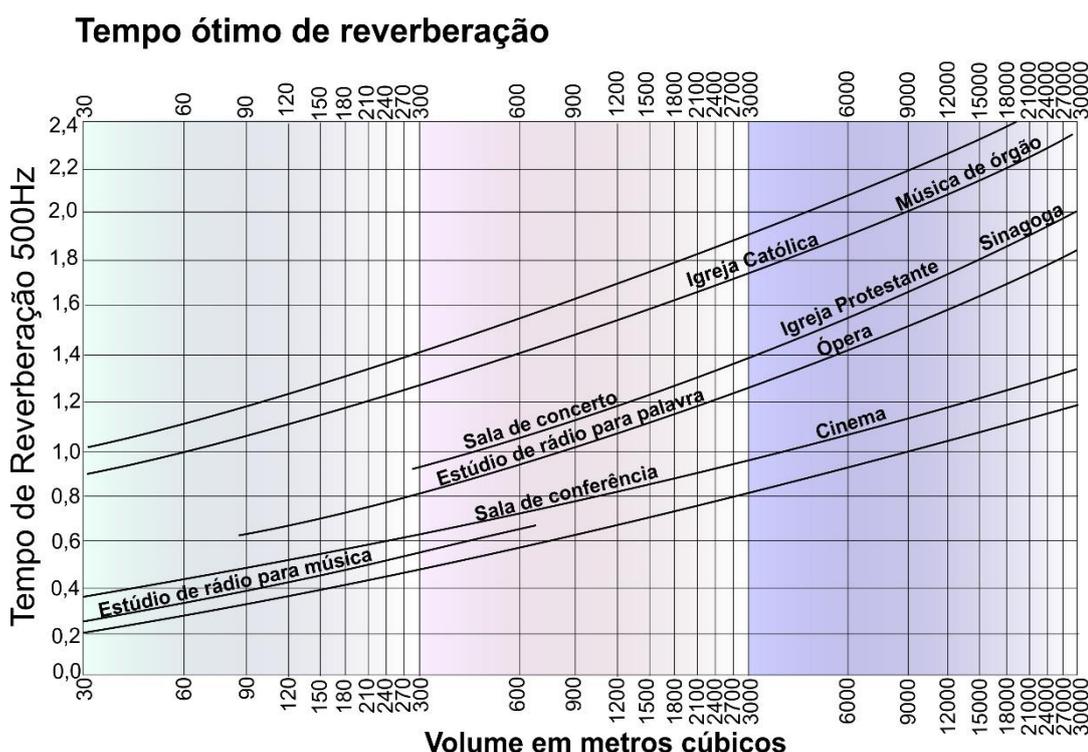
$\alpha$  – Coeficiente de absorção acústica do material da superfície.

Convencionou-se definir o TR de 500Hz para classificação de salas no gráfico de tempo ótimo de reverberação (CARVALHO, 2006). Para saber o tempo ótimo de reverberação para outros ambientes, Mehta et al. (1999) explica que o valor para

500Hz é o mesmo para frequências em sequência (1kHz, 2kHz, etc.). Para frequências de 250Hz, multiplica-se o valor de 500Hz por 1,15 e para 125Hz, o valor de multiplicação é 1,3.

A figura 74, adiante, relaciona o tempo de reverberação ideal com o volume do espaço para cada tipo de atividade conforme NBR 12179 (ABNT, 1992). Por exemplo, para uma igreja católica de 600m<sup>3</sup>, o TR ótimo é 1,4 segundos. Para 125Hz, o valor é 1,82 segundo e para 250 Hz, 1,61 segundo.

**Figura 74:** Tempo ótimo de reverberação em função do volume do ambiente para 500Hz.



Fonte: adaptado de ABNT (1992).

Percebe-se, na mesma figura, que mesmo em ambientes volumosos, o tempo de reverberação limite aceitável para determinadas atividades é de 2,4 segundos. Deve-se deixar bem claro que é necessário adequar o TR ao volume da sala, pois “um RT60 de 1 segundo pode representar uma sala de 50m<sup>3</sup> muito ‘viva’, e um ginásio de 15mil m<sup>3</sup> bastante ‘morto’ ” (VALLE, 2006).

Ou seja, para cada tipo de uso do ambiente, há um TR adequado. Anos após o desenvolvimento da fórmula de Sabine, em 1935, o químico mexicano Henry Eyring aprimorou os cálculos de originais, apresentando uma nova equação mais elaborada para o cálculo de tempo de reverberação (equação 15):

$$TR = \frac{0,161 \cdot V}{-\sum S \cdot \ln(1-\bar{\alpha})} \text{ segundos} \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

TR = Tempo de Reverberação (segundos);

0.161 = Constante de Multiplicação;

V = Volume do Ambiente (m<sup>3</sup>);

$\sum S$  – Somatório das áreas das superfícies (m<sup>2</sup>);

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

$\bar{\alpha}$  = Índice Médio de Absorção dos Materiais (sabines).

A fórmula de Eyring concede resultados precisos para tempos de reverberações de salas mais absorvedoras, enquanto que a fórmula de Sabine apresenta resultados mais confiáveis para salas muito reflexivas. Com isso, antes de se iniciar o cálculo de reverberação de um ambiente, deve-se encontrar a o índice médio de absorção ( $\bar{\alpha}$ ) da sala estudada para selecionar a fórmula mais adequada para o diagnóstico.

Se o valor encontrado de  $\bar{\alpha}$  for acima de 0,5 segundos, significa que o ambiente é absorvedor e a fórmula de Eyring deverá ser usada, porém se o valor encontrado for abaixo de 0,5 segundos, significa que o ambiente é reflexivo e deverá ser usada a fórmula de Sabine (MEHTA *et al*, 1999). Métodos, normas e *softwares* para a obtenção de TR são apresentados nas seções 2.6 e capítulo 3.

### **A1.2.2. Parâmetros de isolamento acústico de ruído aéreo**

Os materiais de isolamento sonoro têm como característica impedir o som transmitido entre partições, e terminam por refletir a energia sonora de volta para a sala produtora de ruído, sem absorvê-la (BSI, 2014). Um material é considerado bom isolante acústico quando proporciona a reflexão de parte da energia sonora incidente sobre ele, e bom absorvedor acústico quando conserva uma quantidade maior de ondas sonoras e as transforma em energia térmica (ERMANN, 2015).

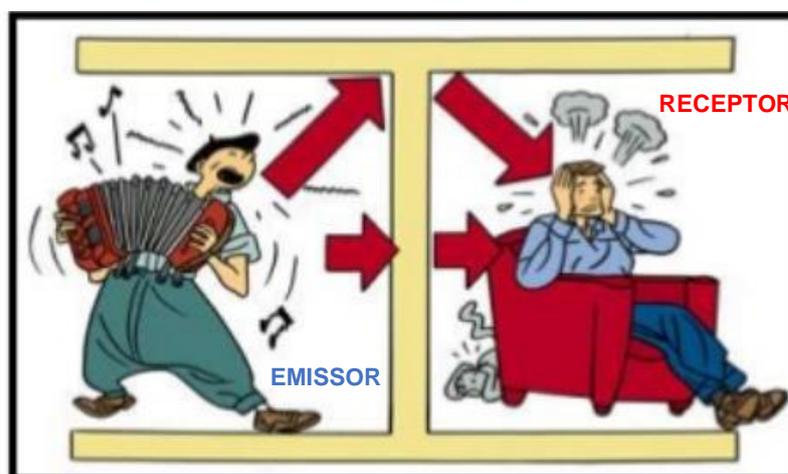
Em ambos os casos, o intuito é atenuar a transmissão sonora de um meio para outro (BISTAFA, 2011). Os parâmetros de avaliação da eficiência do isolamento

acústico norteiam para a metodologia de avaliação da redução de ruído por absorção e alguns conceitos definidos em normas técnicas de isolamento foram utilizados nas etapas metodológicas que serão apresentadas no capítulo 4. Note-se, a seguir, que há vários termos e nomenclaturas para o mesmo parâmetro.

### a) Diferença de Nível entre ambientes (D) ou Redução de Ruído (NR)

O parâmetro básico do isolamento sonoro é a diferença de nível (D), também chamada de redução de ruído (NR – do inglês *Noise Reduction*), sendo a diferença aritmética entre os níveis de pressão sonora medidos entre recinto emissor e recinto receptor (Hopkins, 2007).

**Figura 75:** Diferença de nível entre ambientes (partições).



Fonte: adaptado de ACUSTICA Y SONIDO (2018).

Dessa forma, esse parâmetro relaciona o som entre dois ambientes para avaliar o comportamento resultante entre os materiais empregados neles. A equação 16 a seguir, representa a relação.

$$D = L_{eq1} - L_{eq2} \text{ dB} \quad (\text{Equação 16})$$

Onde:

$L_{eq1}$  = NPS equivalente da sala emissora (dB);

$L_{eq2}$  = NPS equivalente da sala receptora (dB).

O  $L_{eq}$ , NPS equivalente, é o ruído contínuo equivalente durante um determinado intervalo de tempo (ABNT, 2000). É um parâmetro utilizado para avaliar os níveis de ruído no interior ou exterior de áreas habitadas. Por considerar o ruído

para humanos, o filtro de ponderação A é geralmente aplicado, sendo chamado de LAeq. Caso seja avaliada a energia acústica do ambiente através de curvas de critério de ruído, usa-se Leq (ver seção 2.4.2). Seus valores são obtidos através de medições acústicas e aplicados na seguinte fórmula (BSI, 2001):

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \left\{ \left( \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(t) dt \right) / p_0^2 \right\} dB(A) \quad (\text{Equação 17})$$

Onde:

$L_{Aeq,T}$  = NPS equiv. ponderado em A (ou não) em um intervalo  $T = T_2 - T_1$ ;

$p_A^{(t)}$  = NPS (A) – ponderado em A, ou não – no instante de captação do ruído;

$p_0$  = NPS de referência = 20μPa.

A norma ISO 16283-1 (ISO, 2014) apresenta, em um de seus itens, o cálculo do Leq médio na sala emissora a partir do posicionamento de diversos pontos de captação. A formula de nível de pressão sonora médio equivalente é dada por:

$$L_{eq} = 10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{L_i/10} \right) dB \quad (\text{equação 18})$$

Onde:

$L$  = média de nível de pressão sonora equivalente sem ponderação ( $L_{eq}$ ), onde  $L_1, L_2... L_n$  correspondem aos  $L_{eq}$  encontrados em cada um dos pontos de medição.

### **b) Perda de Transmissão Sonora (TL) ou Índice de Redução Sonora (R)**

A perda de transmissão sonora (TL – do inglês *Transmission Loss*), também chamada de índice de redução sonora (R), relaciona a característica do material ou do conjunto de materiais empregados para alcançar a redução de ruído (D ou NR) desejada entre os ambientes. Relaciona coeficiente de transmissão sonora do material ( $\tau$ ), valor obtido em laboratório e definido como a razão entre a energia (potência) sonora transmitida ( $W_1$ ) pelo material e incidente no mesmo ( $W_2$ ) (HOPKINS, 2007).

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (\text{Equação 19})$$

A norma ISO 140-3 (ISO, 1995) mostra que para encontrar o índice de redução sonora através de  $\tau$ , é usada a seguinte equação:

$$R = 10 \log \frac{1}{\tau} \text{ dB} \quad (\text{Equação 20})$$

Outro meio de encontrar R (ou TL) é através da Lei da Massa (PAIXÃO; GERGES, 2004):

$$R = 20 \log M \times f - 47,4 \text{ dB} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

M = densidade superficial do material (kg/m<sup>2</sup>)

f = frequência atenuada pelo material analisado (Hz)

Da mesma forma que no estudo para o condicionamento acústico, a abordagem teórica apresentada para o estudo das propriedades isolantes de materiais com densidade superficial conhecida norteia a análise inicial para a escolha de qual material deverá ser empregado no isolamento acústico entre partições para haver a composição de diferentes impedâncias que contenham a transmissão sonora. Após isso, o processo de modelagem através de *softwares* traz qualidade à validade dos resultados (PAIXÃO; GERGES, 2004).

De qualquer forma, para o estudo da redução de ruído por absorção, é importante saber as propriedades acústicas dos materiais empregados em condicionamento e isolamento acústicos para, assim, encontrar relações nas discussões dos resultados obtidos, afinal, o objetivo do presente trabalho é avaliar a redução do campo sonoro difuso de quadra poliesportiva.

Mehta *et al* (1999) é claro ao afirmar que não se pode assumir que um material absorvedor espesso com alto NRC ( $\alpha$ ) proporcione elevada perda de transmissão sonora. Isso fica evidente ao justificar que o coeficiente de absorção sonora está aplicado a uma escala linear, enquanto R (ou TL) está em uma escala logarítmica.

Isso quer dizer que 100mm de lã de vidro é capaz de impedir que apenas 13dB seja transmitido de um ambiente para o outro, mas isso considerando a aplicação deste material próximo ao emissor (com forte incidência do campo sonoro direto),

situação diferente do objeto de estudo avaliado no presente trabalho e esclarecida no capítulo 5 desta dissertação.

Em resumo, para esclarecer as definições dos parâmetros apresentados, a diferença de nível (D) não decorre somente da natureza inerente dos materiais, como ocorre na mensuração do Índice de Redução Sonora (R), uma vez que é aplicada para medições em campo. Engloba, portanto, outros aspectos relacionados ao “[...] local da medição dos níveis de pressão sonora, volume do enclausuramento, orifícios existentes, absorção acústica, etc [...]” (GERGES, 1992).

### **A1.3. Considerações finais do apêndice 1**

Este capítulo introduziu conceitos físicos importantes para a compreensão do comportamento sonoro desde o ambiente ideal abordado nas teorias do campo da física, quanto em condição natural. Discutiu-se a importância de alguns parâmetros acústicos para a compreensão da redução de ruído por absorção e dos procedimentos metodológicos, onde os conceitos de condicionamento e isolamento acústicos receberam explicações mediante cálculos e fórmulas.

## APÊNDICE 2 – ESTUDO DE REPERTÓRIO EM ARQUITETURA E ACÚSTICA DE GINÁSIOS ESCOLARES EM MACEIÓ

Com a finalidade de estabelecer um critério comparativo para a escolha do objeto de estudo, três ginásios poliesportivos escolares da cidade de Maceió - AL (figura 76) foram escolhidos para uma breve avaliação das características arquitetônicas e de seus desempenhos em acústica, são eles:

- Ginásio poliesportivo da escola A;
- Ginásio poliesportivo da escola B;
- Ginásio poliesportivo do colégio C.

**Figura 76:** Localização das escolas no mapa parcial de Maceió-AL.



Fonte: adaptado de GOOGLE MAPS (2018).

O critério de escolha das 3 escolas foi proporcionado pela facilidade de acesso às mesmas para a realização do levantamento, bem como a situação dos mesmos: inseridos em um ambiente urbano e residencial. O método empregado para a caracterização acústica de cada uma das quadras poliesportivas das escolas seguiu as diretrizes definidas na NBR 10.151 para a obtenção do  $L_{eq}$  (nível de pressão sonora equivalente) a no mínimo, 1 metro de distância da face interna das paredes dentro da edificação com sonômetro tipo 2 (ABNT, 2000).

O ruído captado no exterior das edificações seguiu as diretrizes da NBR 10.151, ao posicionar o sonômetro a pelo menos 2 metros fora da edificação (ABNT, 2000). O objetivo dessas medições é para a definição do objeto de estudo que receberá análise aprofundada. Uma vez que essas medições são para efeito comparativo, apenas três medições foram realizadas por ponto. Todas as aferições ocorreram no período da tarde e registraram, por 1 minuto, o ruído dos recintos em aulas de educação física em cada um dos ginásios com uma média de 20 crianças.

### A2.1. Ginásio poliesportivo da escola A

A escola A está situada no bairro Ponta Verde em Maceió-AL. As atividades esportivas realizadas em seu ginásio são voltadas a crianças do nível pré-escolar ao 5º ano do ensino fundamental. O local é voltado para a Rua Prof. Vital Barbosa e recebe eventos variados, como missas e festividades escolares com alunos, professores e familiares em datas comemorativas. Este espaço possui dimensões (comprimento x largura x altura) de 24m x 12m x 6m (ponto mais alto e 4m no ponto mais baixo).

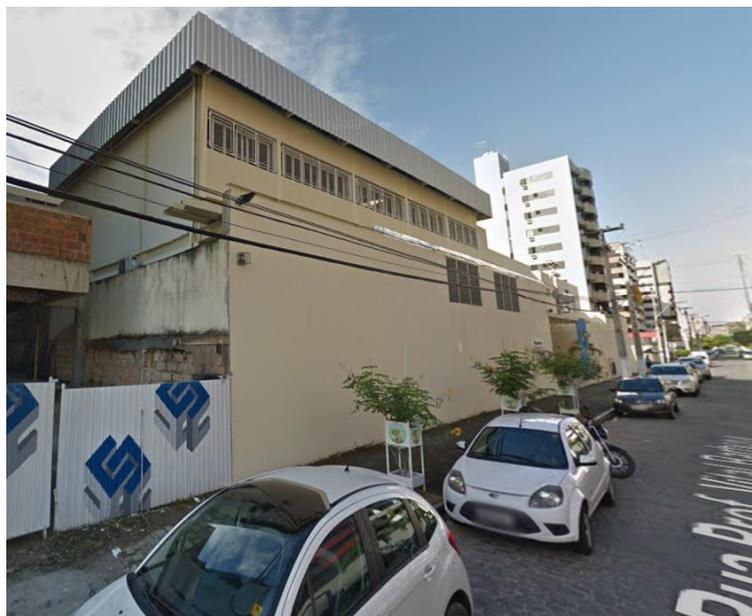
**Figura 77:** Vista em satélite da escola A, do ginásio e vias.



Fonte: adaptado de GOOGLE MAPS (2018).

A cobertura estruturada em tesoura com lanternim possui dois níveis, o primeiro, mais baixo, com 4 águas e o segundo nível, mais alto, com duas águas envolvida lateralmente por telha metálica. Os materiais empregados em suas superfícies internas são: alvenaria, concreto, estrutura metálica, cobertura em telha metálica simples e piso em poliuretano autonivelante sem camada amortecedora de impactos.

**Figura 78:** Fachadas do ginásio da escola A.



Fonte: adaptado de GOOGLE STREET VIEW (2018).

A medição realizada no interior do recinto em atividade com crianças revelou valor de  $L_{eq}$  de Na rua em frente ao ginásio, o valor de  $L_{eq}$  encontrado foi 94,3dB. Na rua em frente ao ginásio (Prof. Vital Barbosa), o valor de  $L_{eq}$  encontrado foi 78,1dB.

**Figura 79:** Medições interna e externa – Escola A.

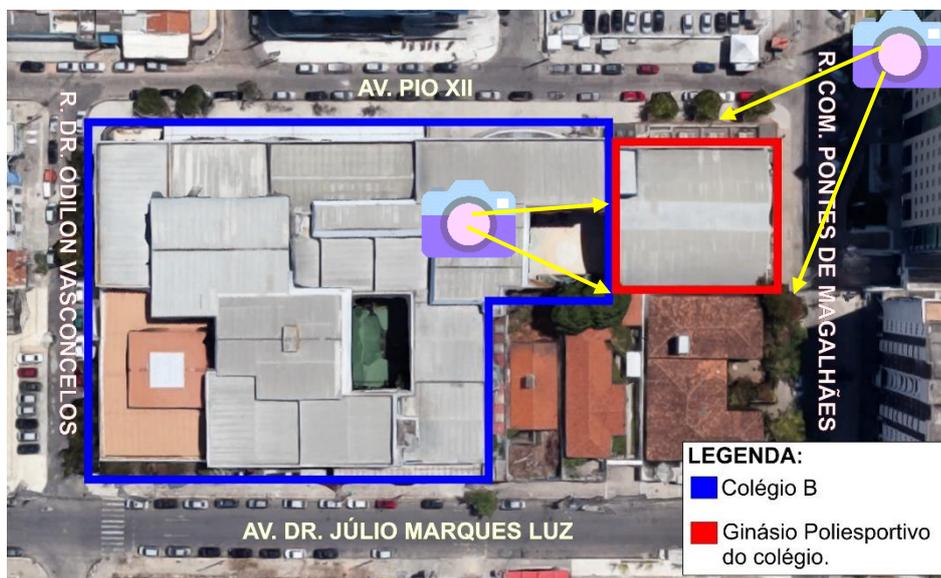


Fonte: O Autor (2018).

## A2.2. Ginásio poliesportivo do colégio B

O colégio B está situado no bairro Jatiúca em Maceió-AL. As atividades esportivas realizadas no ginásio são voltadas a crianças do nível pré-escolar a jovens do ensino médio. Eventos como torneios esportivos e festividades escolares com alunos, professores e familiares são realizadas em datas comemorativas.

**Figura 80:** Vista em satélite do colégio B e seu ginásio.



Fonte: adaptado de GOOGLE MAPS (2018).

Este espaço possui dimensões (comprimento x largura x altura) de 26m x 24m x 10,45m (ponto mais alto) Os materiais empregados em suas superfícies internas são: alvenaria, concreto, estrutura metálica, cobertura abobadada em telha metálica simples e piso em poliuretano autonivelante sem camada amortecedora de impactos.

**Figura 81:** Fachadas do ginásio da escola B.



Fonte: O Autor (2018).

A medição realizada no interior do recinto em atividade com crianças revelou valor de  $L_{eq}$  de 85,3dB. Na rua em frente ao ginásio (Com. Pontes de Magalhães), o valor de  $L_{eq}$  encontrado foi 75,4dB.

**Figura 82:** Medições interna e externa – Ginásio da escola B.

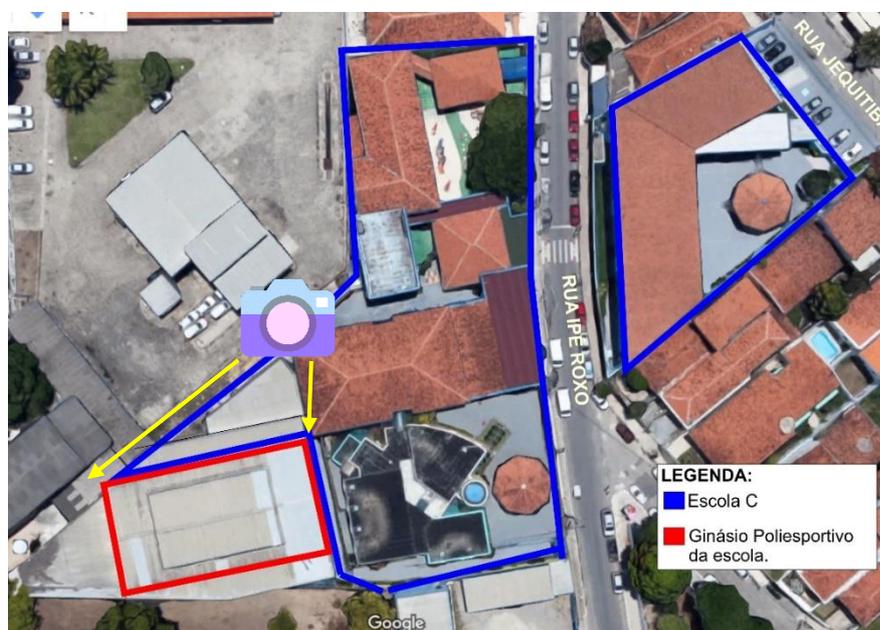


Fonte: O Autor (2018).

## A2.2. Ginásio poliesportivo da escola C

A escola C está situada no bairro Gruta de Lourdes em Maceió-AL. As atividades esportivas realizadas no ginásio são voltadas a crianças do nível pré-escolar a jovens do ensino médio. Eventos como jogos internos, torneios esportivos com outras escolas e festividades escolares com alunos, professores e familiares são realizadas em datas comemorativas.

**Figura 83:** Vista em satélite da escola C e do ginásio.



Fonte: Adaptado de GOOGLE MAPS (2018).

Este espaço possui dimensões (comprimento x largura x altura) de 35m x 20m x 14m (ponto mais alto). Sua arquitetura é composta, basicamente, de arquibancadas em alvenaria de bloco batido aparente envernizado, paredes em alvenaria envoltas por estrutura treliçada. Os materiais empregados em suas superfícies internas são: alvenaria, concreto, estrutura metálica, cobertura em treliça espacial e telha metálica simples e piso em poliuretano autonivelante sem camada amortecedora de impactos.

**Figura 84:** Vistas internas da escola C e do ginásio.



Fonte: O Autor (2018).

A medição realizada no interior do recinto em atividade com crianças revelou valor de  $L_{eq}$  de 84,2dB. Como o ginásio não se encontra próximo a ruas, a medição foi feita a 2m do muro que divide essa área esportiva com a cantina do colégio. O valor de  $L_{eq}$  encontrado foi 78,7dB.

**Figura 83:** Medições interna e externa – Escola C.



Fonte: O Autor (2018).

### A2.3. Curvas NC e NR do levantamento realizado nos 3 ginásios

A compilação dos valores globais dos três ginásios levantados está na Tabela 18, a seguir:

**Tabela 18:** Levantamento arquitetônico e acústico dos 3 ginásios selecionados.

Ginásio	Medidas (CxLxA em metros)	Leq Global INTERNO dB	Leq Global EXTERNO dB	Atende à curva NR 40? (EXTERNO)
Escola A	24 x 12 x 6	<b>94,3</b>	<b>78,1</b>	
Colégio B	24 x 26 x 10,45	<b>85,3</b>	<b>75,4</b>	
Escola C	35 x 20 x 12	<b>84,2</b>	<b>78,7</b>	

Fonte: O Autor (2018).

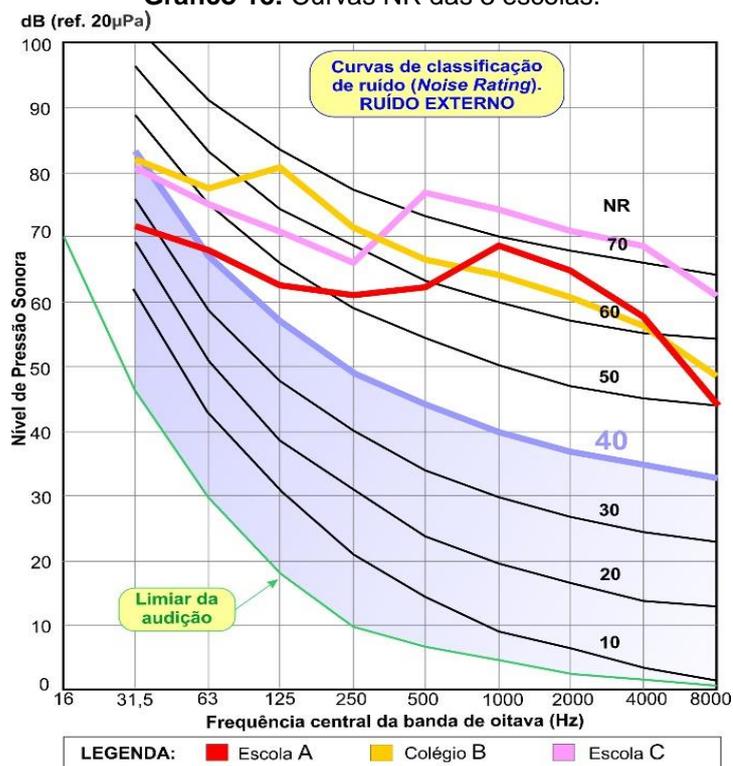
Os valores das NR das 3 escolas estão representadas na Tabela 19, a seguir, juntamente com a margem de valores de NC 40, permitidos para ginásios poliesportivos segundo a NBR 10.152 (ABNT, 2017) e NR 40, segundo diretrizes inglesas (SPORTS ENGLAND, 2012) para a mesma tipologia de edificação.

**Tabela 19:** Valores das curvas NR obtidos X Valores recomendados.

Tolerância / Escolas	Frequências										
	16Hz	31,5Hz	63Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1kHz	2kHz	4kHz	8kHz	16kHz
<b>NR40 - dB</b> (FAHY, 2000)	--	82,6	67,1	56,8	49,2	43,8	40	37,1	34,9	33,2	--
<b>NR (A) – dB</b>	--	71,2	68,8	63,6	61,7	63,8	69,6	64,7	57,8	44,8	--
<b>NR (B) – dB</b>	--	82,4	78,7	80,9	73,6	67,2	64,6	61,8	55,6	48,2	--
<b>NR (C) – dB</b>	--	80,2	76,1	70,7	64,4	77,6	73,9	70,4	68	61	--

Fonte: O Autor (2018).

As curvas NR das 3 escolas estão representadas no gráfico 13. E os valores registrados nos ginásios poliesportivos das três escolas estão muito acima do recomendado tanto no interior quanto no exterior do recinto.

**Gráfico 13:** Curvas NR das 3 escolas.

Fonte: O Autor (2018).

#### A2.4. Considerações finais do apêndice 2

A partir dessa constatação, levantaram-se os níveis de ruído externo de ginásios poliesportivos de 3 escolas particulares em Maceió (A, B e C) para investigar se os valores obtidos enquadram-se nas curvas NR (*Noise Rating* – classificação de ruído, relacionado a ruído externo) estabelecidas por Fahy (2000). A investigação mostra que todos os ginásios estão com níveis muito acima do recomendado. No que se refere ao ruído do entorno da edificação, os valores de NR obtidos para o ginásio poliesportivo da escola A foram menores que para as outras escolas. É importante ressaltar que para o ginásio da escola C, o ruído captado no exterior do recinto era gerado pela movimentação de alunos na cantina adjacente a ele. Os valores obtidos nas medições realizadas em todos os ginásios também ultrapassam a curva recomendada (NR 40) da norma inglesa. De qualquer forma, vale destacar, salva a situação excepcional para a escola C, que o ruído gerado pelo ginásio da Escola A é o mais elevado dentre todos os avaliados e está implantado ao redor de um ambiente menos ruidoso em comparação com os outros 2. O capítulo 3 mostra os critérios que levaram a escolha do objeto de estudo deste trabalho e apresenta e justifica métodos para a obtenção de dados arquitetônicos e acústicos do mesmo.

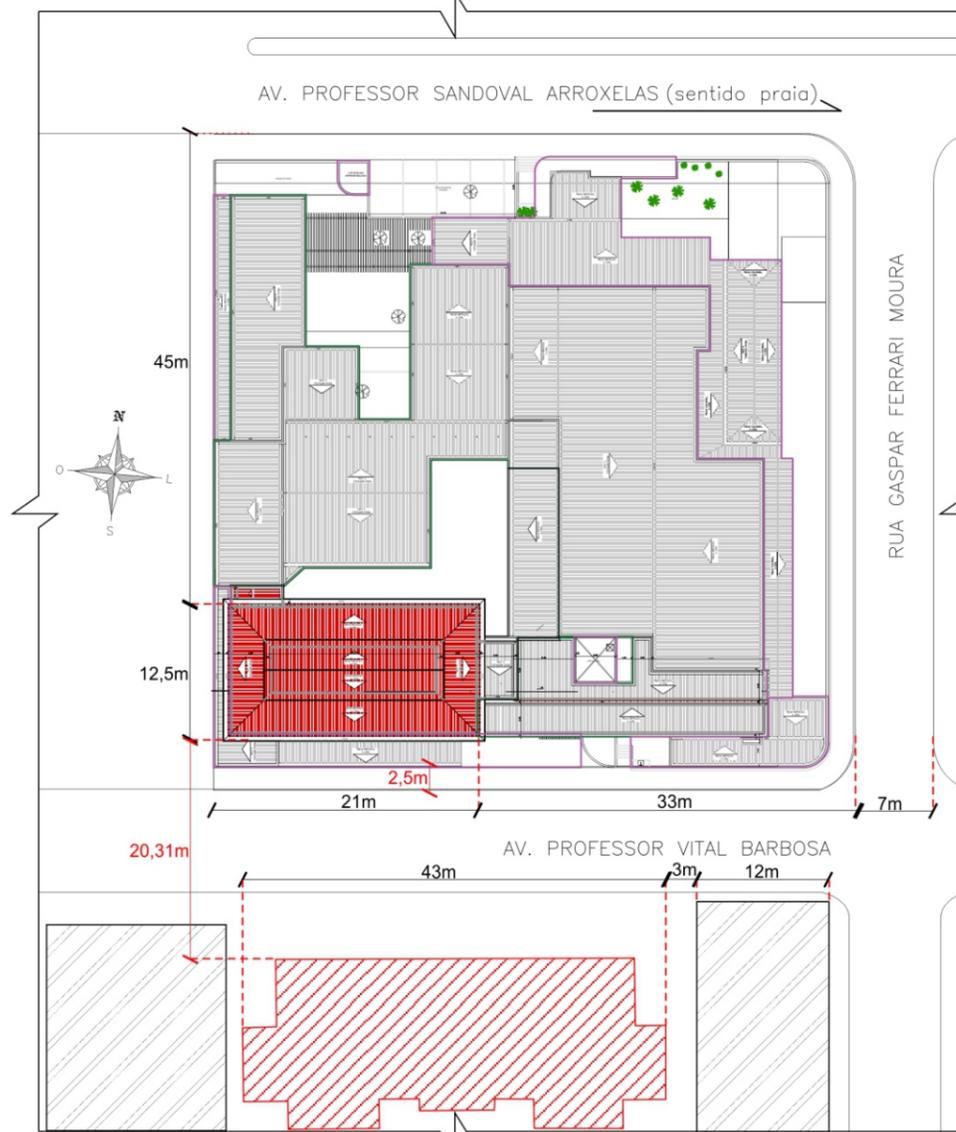
# APÊNDICE 3: Dados arquitetônicos e acústicos estatísticos do objeto de estudo.



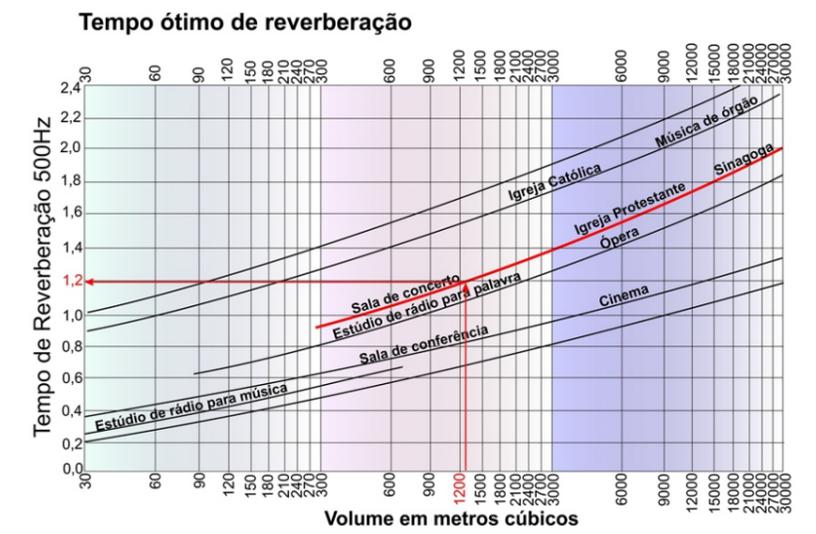
**Legenda:** ■ Ginásio Poliesportivo da Escola A ■ Escola A ■ Edifício Reclamante



Rua Prof. Vital Barbosa



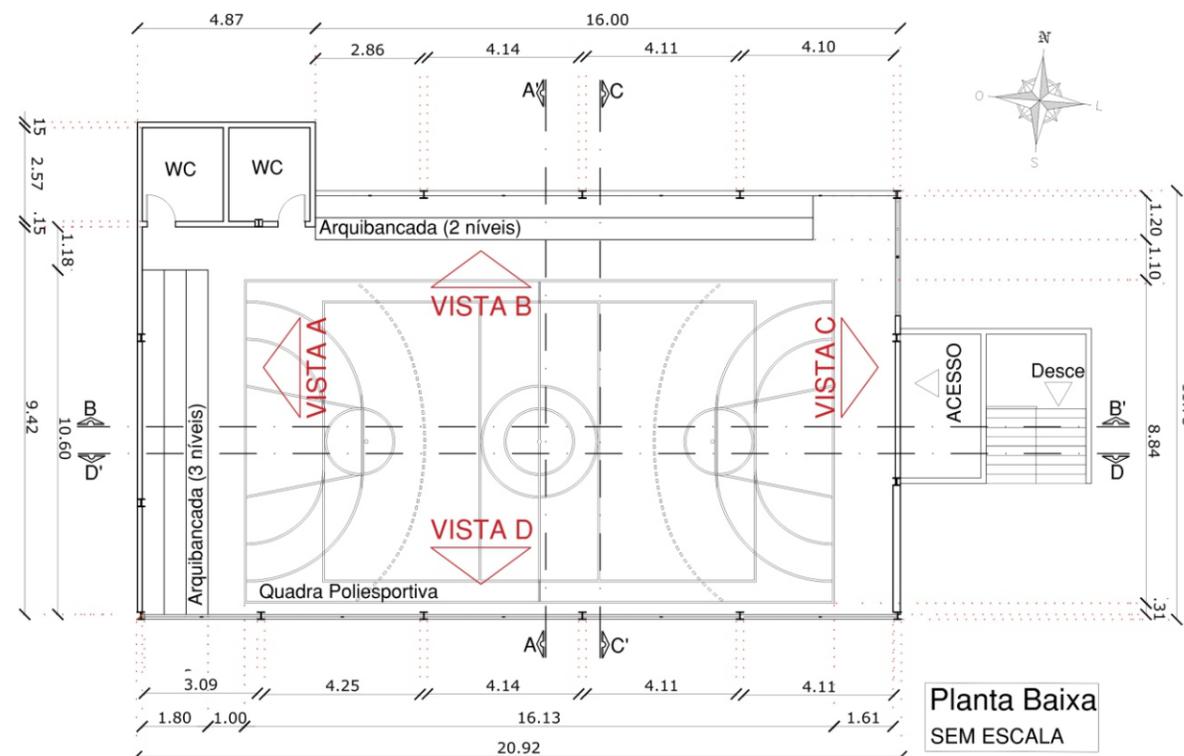
**Legenda:** ■ Ginásio Poliesportivo. ■ Coberta da escola ■ Edifício Reclamante ■ Edificações complementares SEM ESCALA



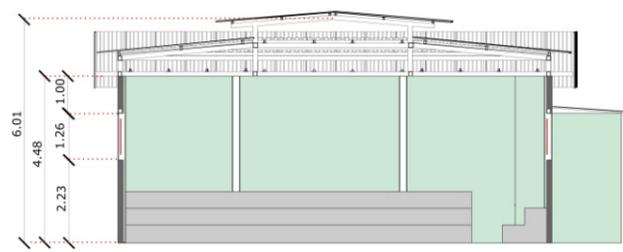
MATERIAIS	α / Frequências (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Reboco liso pintado (paredes)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,06	0,02
Abertura com gradil (ar)	1	1	1	1	1	1	1
Metal (pilares)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Alumínio (telhas)	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,025
Concreto liso pintado (piso)	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,018
Porta de madeira compensada pintada a óleo	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,033
Abertura (duto) de ventilação (acesso)	0,16	0,20	0,30	0,35	0,29	0,21	0,29

Setores	ÁREAS	Unid.	Setores	ÁREAS	Unid.
<b>Parede Entrada (VISTA C)</b>			<b>Parede Esquerda (VISTA B)</b>		
Alvenaria	35,899	m <sup>2</sup>	Alvenaria	61,669	m <sup>2</sup>
Ar (janela)	4,049	m <sup>2</sup>	Ar (janela)	24,592	m <sup>2</sup>
Metal	5,989	m <sup>2</sup>	Metal	8,483	m <sup>2</sup>
Abertura de entrada	9,623	m <sup>2</sup>	Concreto	94,49	m <sup>2</sup>
<b>Parede Fundo (VISTA A)</b>			<b>Parede Direita (VISTA D)</b>		
Alvenaria	33,321	m <sup>2</sup>	Alvenaria	54,086	m <sup>2</sup>
Metal	5,274	m <sup>2</sup>	Ar (janela)	19,167	m <sup>2</sup>
Concreto	13,794	m <sup>2</sup>	Metal	8,072	m <sup>2</sup>
<b>Piso</b>			<b>Forro</b>		
Quadra	198,323	m <sup>2</sup>	Telha de Alumínio	236,63	m <sup>2</sup>
Concreto	33,289	m <sup>2</sup>			

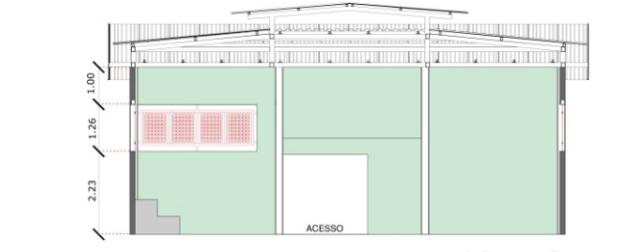
Somatório das áreas = 862,963m<sup>2</sup>  
**VOLUME = 1286,313m<sup>3</sup>**



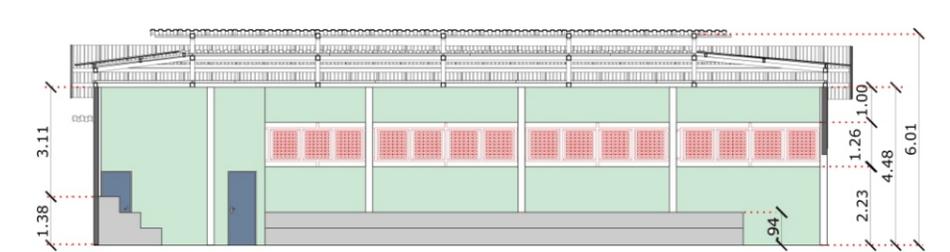
**Planta Baixa SEM ESCALA**



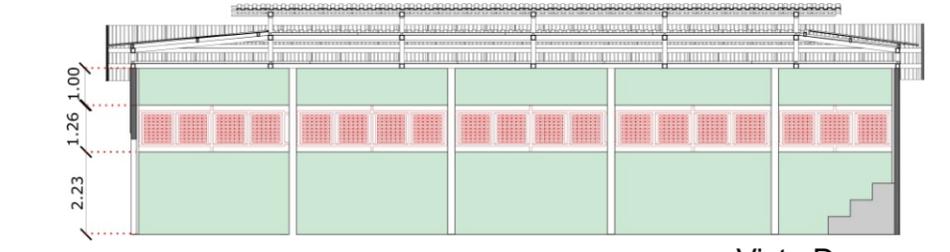
**Vista A**



**Vista C**



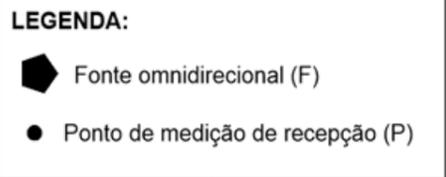
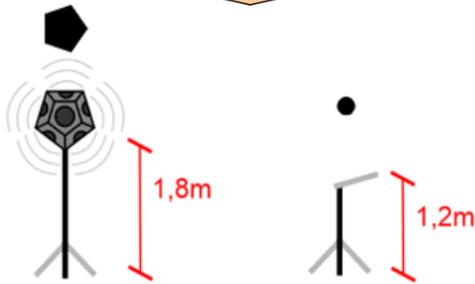
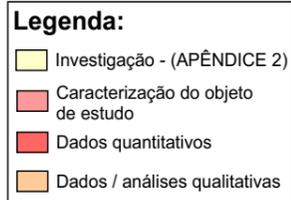
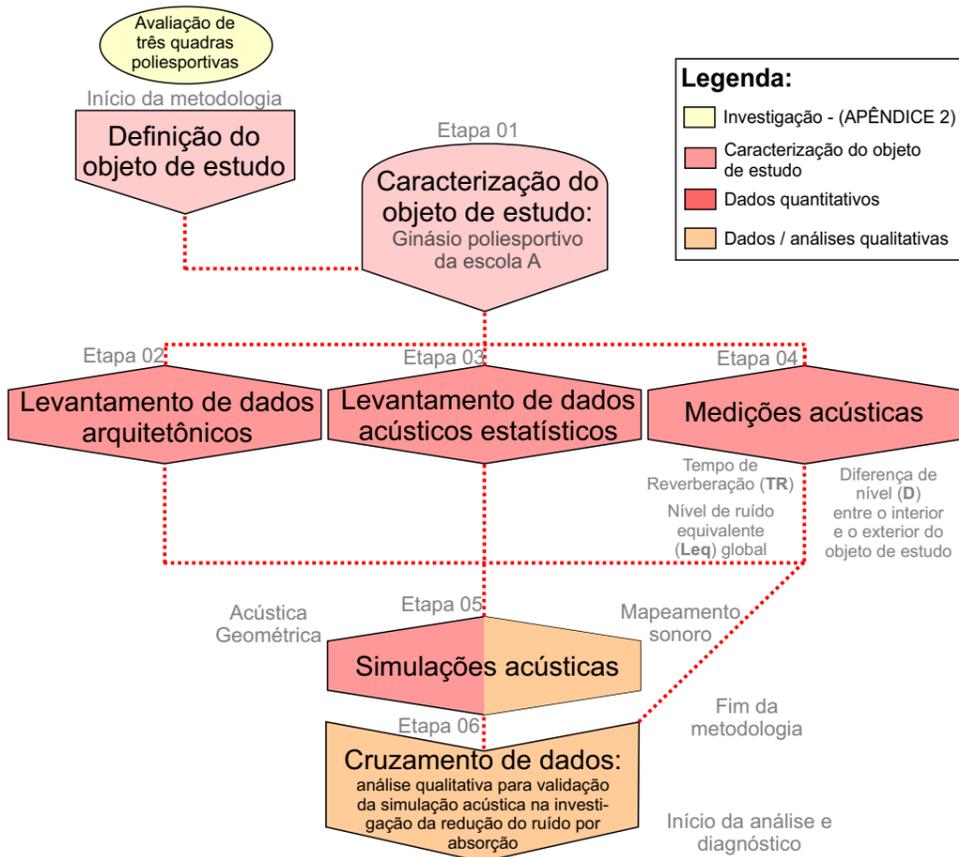
**Vista B**



**Vista D**

**Legenda:** ■ Corte na alvenaria ■ Porta de madeira compensada pintada a óleo  
 ■ Reboco liso pintado ■ Concreto liso pintado ■ Estrutura metálica ■ Abertura com gradil ■ Telha em allumínio

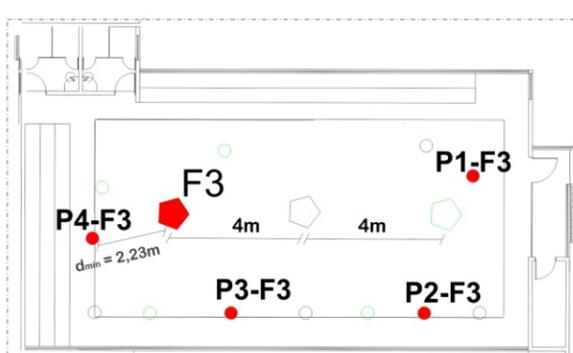
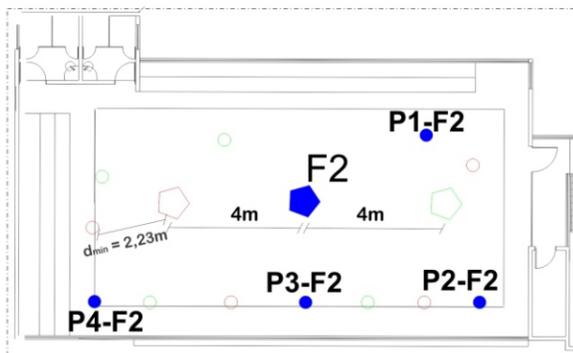
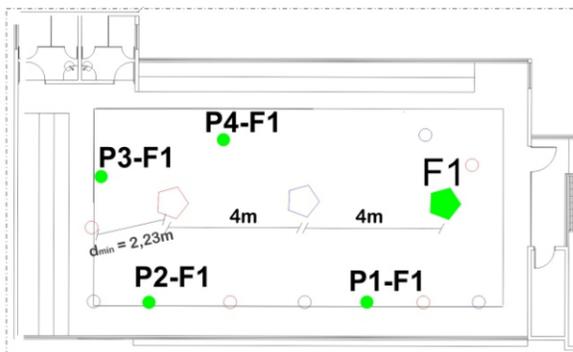
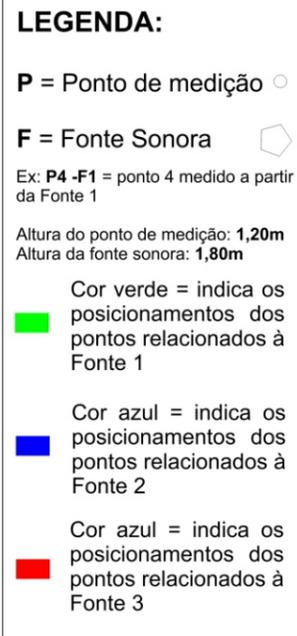
# APÊNDICE 4: Resumo da metodologia



Distância Fonte - Microfone:

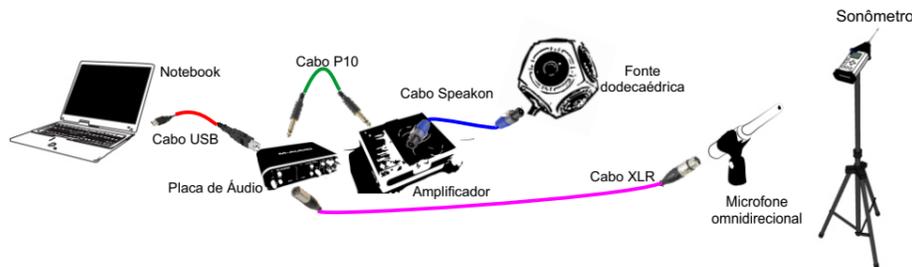
$$d_{\min} = 2\sqrt{\frac{V}{cT}} = 2,23\text{m}$$

V = Volume do recinto (m³) = 1283,31 m³  
 c = velocidade do som (m/s) = 345,7 m/s  
 T̂ = Tempo de reverberação estimado do recinto (s) = 3 segundos

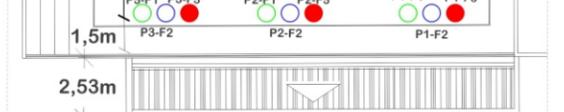
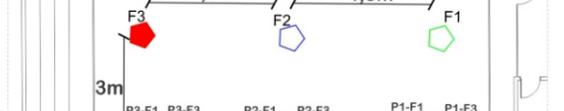
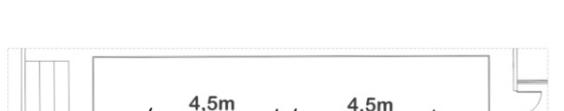
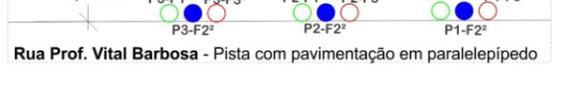
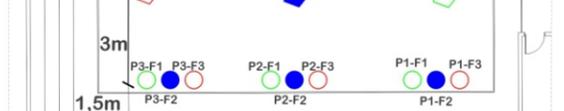
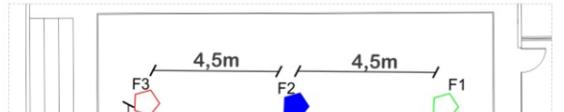
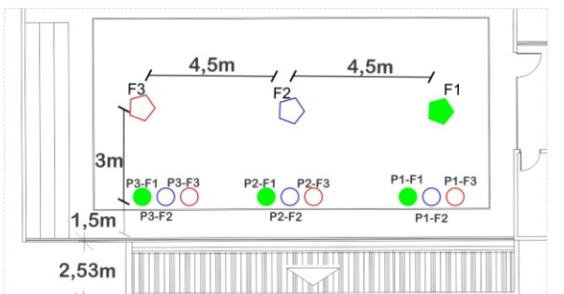
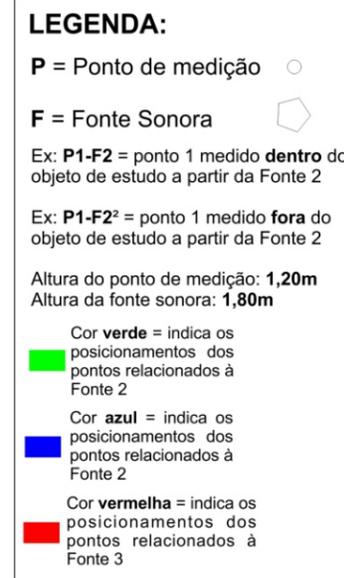


MÉTODO NOVO de obtenção de TR e Leq: ISO 18233 Swept sine technique (ISO, 2006)

MÉTODO CONVENCIONAL de obtenção de Leq por ruído estacionário: ISO 16283-1 Ruído Branco (ISO, 2016)



Parâmetro	Nome / Sigla	Descrição
Tempo de Reverberação (TR)	Cálculo	Obtido através da equação de Sabine.
	Medição	Obtido através do método de resposta integrada ao impulso no software Room EQ Wizard (REW).
	Simulação	Obtido pelo método do raio traçado no software EASE 4.3
Nível de ruído equivalente (Leq)	MRBs	Medição de Ruído Branco com o uso de sonômetro. Valores médios obtidos através do método de medição de ruído estacionário.
	MRBmo	Medição de Ruído Branco com o uso de microfone omnidirecional. Valores médios obtidos através do método de medição de ruído estacionário captados pelo REW no modo RTA - Real Time Analyser.
	MSS	Medição com Sinal Sweep. Valores médios obtidos através do método de resposta integrada ao impulso captados pelo REW unicamente com o microfone omnidirecional.
	Simulação	O software EASE 4.3 nomeia o Leq global no modelo virtual como "Total SPL", configurado como o NPS da soma entre os campos sonoros direto e difuso.



MÉTODO CONVENCIONAL de obtenção de Leq por ruído estacionário: ISO 16283-1 Ruído Branco (ISO, 2016)

## RESUMO:

A Fase 2 tem a finalidade de descobrir a energia acústica que evade do objeto de estudo. O parâmetro buscado foi o Leq, (NPS equivalente) em dB, medido interna e externamente ao objeto de estudo, possibilitando a obtenção de D, diferença de NPS entre os dois setores de medição dentro e fora do ginásio poliesportivo. Não foi usado nenhum tipo de ponderação por se tratar de uma investigação referente a energia acústica.

Nesta etapa, foram usados dois métodos para obtenção de Leq (ruído branco e sinal sweep). Para obtenção do Leq foram utilizados dois sistemas de medição distintos: sonômetro convencional com o software dBbati e microfone omnidirecional com o software REW. No segundo método, utilizando o microfone omnidirecional, foram usados tanto o sinal sweep quanto a medição por ruído branco.

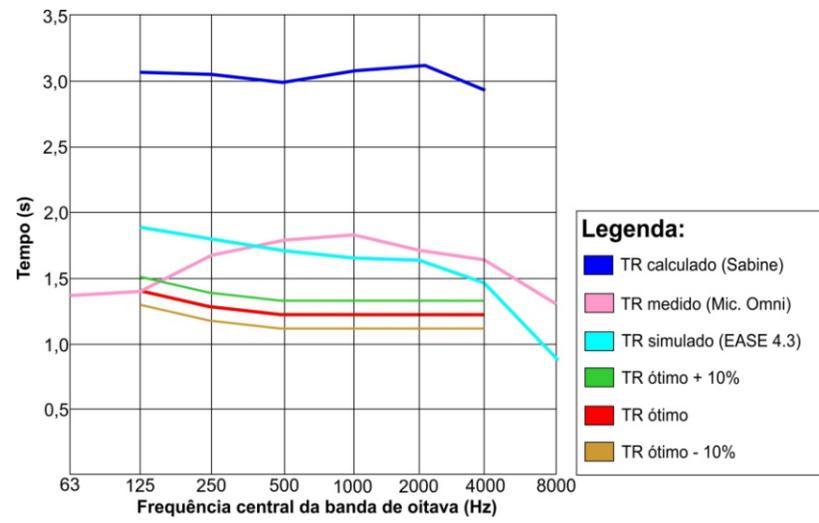
Dessa forma, para cada posição da fonte sonora, foram medidos 6 pontos, e para cada ponto, foram utilizados três métodos de medição, totalizando 18 medições por posição de a fonte sonora. Como 3 posições de fonte sonora foram determinadas a partir de orientações da norma ISO 3382-2 (ISO, 2008), foram feitas 54 no total absoluto para esta fase.

Parâmetro	Nome / Sigla	Descrição
Diferença de Nível de ruído equivalente - Leq (D)	RR-i	Ruído Residual interior - captação do ruído no interior do objeto de estudo com fonte desligada.
	RR-e	Ruído Residual exterior - captação do ruído no exterior do objeto de estudo com fonte desligada e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.
	LRBs-i	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por sonômetro em todos os pontos no interior do ginásio A.
	LRBs-e	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por sonômetro em todos os pontos no exterior do ginásio A e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.
	LRBmo-i	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por microfone omnidirecional em todos os pontos no interior do ginásio A.
	LRBmo-e	Média aritmética do Leq obtido por Ruído Branco captado por microfone omnidirecional em todos os pontos no exterior do ginásio A e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.
LSS-i	LSS-i	Média aritmética do Leq obtido por Sinal Sweep captado unicamente por microfone omni em todos os pontos no interior do ginásio A.
	LSS-e	Média aritmética do Leq obtido por Sinal Sweep captado unicamente por microfone omni em todos os pontos no exterior do ginásio A e registro da média da movimentação de veículos por período de medição.

# APÊNDICE 5: Síntese dos resultados dos procedimentos metodológicos

## TR - Fase 1

TEMPO DE REVERBERAÇÃO								
Frequência (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
<b>Cálculo</b>	--	<b>3,07 s</b>	<b>3,05 s</b>	<b>2,99 s</b>	<b>3,07 s</b>	<b>3,12 s</b>	<b>2,91 s</b>	--
<b>Medição</b>	<b>1,358s</b>	<b>1,39 s</b>	<b>1,66 s</b>	<b>1,78 s</b>	<b>1,83 s</b>	<b>1,74 s</b>	<b>1,63 s</b>	<b>1,29 s</b>
<b>Simulação</b>	--	<b>1,89 s</b>	<b>1,79 s</b>	<b>1,72 s</b>	<b>1,65 s</b>	<b>1,64 s</b>	<b>1,45 s</b>	<b>0,87 s</b>
<b>IDEAL</b>	--	<b>1,56 s</b>	<b>1,38 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>	<b>1,2 s</b>



Aplicando as fórmulas de redução de ruído por absorção considerando 200m<sup>2</sup> de material sonoabsorvente definido pela equação de Sabine:

(EGAN,2000)

$$RR = 10 \log \frac{A_{\text{Situação original}}}{A_{\text{Após 200m}^2 \text{ material acústico}}}$$

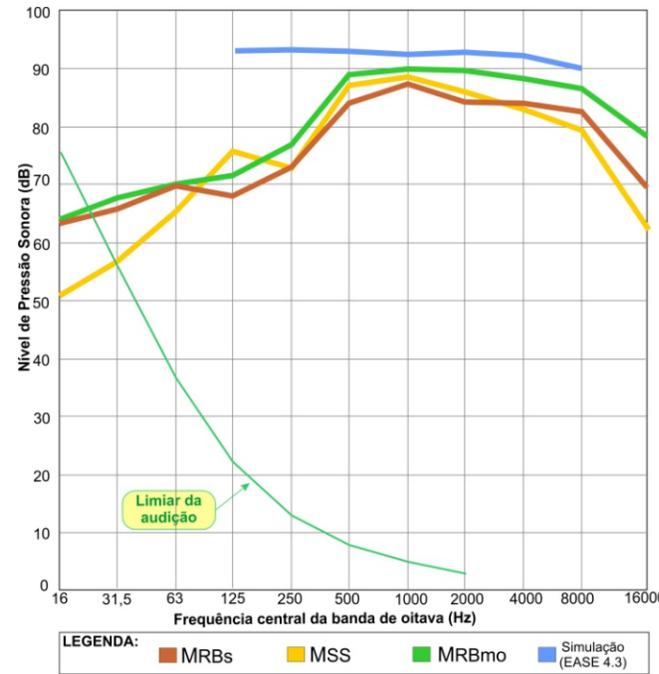
$A_{\text{situação original}} = 409 \text{ Sabines}$   
 $A_{\text{Após 200m}^2 \text{ de material acústico}} = 1208 \text{ Sabines}$

$$= 10 \log \frac{409}{1208}$$

$$= 10 \log 0,334 = -4,76 \text{ dB}$$

## Leq interno - Fase 1

Leq (dB)	Frequência (Hz)											Leq global (dB)
	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
<b>MRBs</b>	63,7	65,5	69,8	68,2	73,5	84,3	87,4	84,6	84,2	82,6	69,0	<b>92,1</b>
<b>MRBmo</b>	64	67,8	70,1	71,8	77,4	89,6	90,4	89,9	88,4	86,7	78,4	<b>96,3</b>
<b>MSS</b>	50,5	56,7	65,7	75,9	73,1	87,3	88,8	85,8	82,9	79,5	61,9	<b>93,1</b>
<b>Simulação</b>	0	0	0	93,7	93,4	93,2	92,8	93,1	92,4	89,7	0	<b>101,2</b>



(GERGES,1992)

$A_{\text{Após 200m}^2 \text{ de material acústico}} = 1208 \text{ Sabines}$   
 $Q_e = 2$

Para  $r = 9,5 \text{ m}$

$$= 10 \log \left( \frac{Q_e}{4\pi r} + \frac{4}{A} \right)$$

$$= 10 \log \left( \frac{2}{(4 \times 3,14 \times 9,5)} + \frac{4}{1208} \right)$$

$$= 10 \log \left( \frac{2}{119,32} + \frac{4}{1208} \right)$$

$$= 10 \log (0,017 + 0,003)$$

$$= 10 \log 0,02$$

$$= 10 \times -1,7 = -17 \text{ dB}$$

Para  $r = 4,5 \text{ m}$

$$= 10 \log \left( \frac{Q_e}{4\pi r} + \frac{4}{A} \right)$$

$$= 10 \log \left( \frac{2}{(4 \times 3,14 \times 4,5)} + \frac{4}{1208} \right)$$

$$= 10 \log \left( \frac{2}{56,52} + \frac{4}{1208} \right)$$

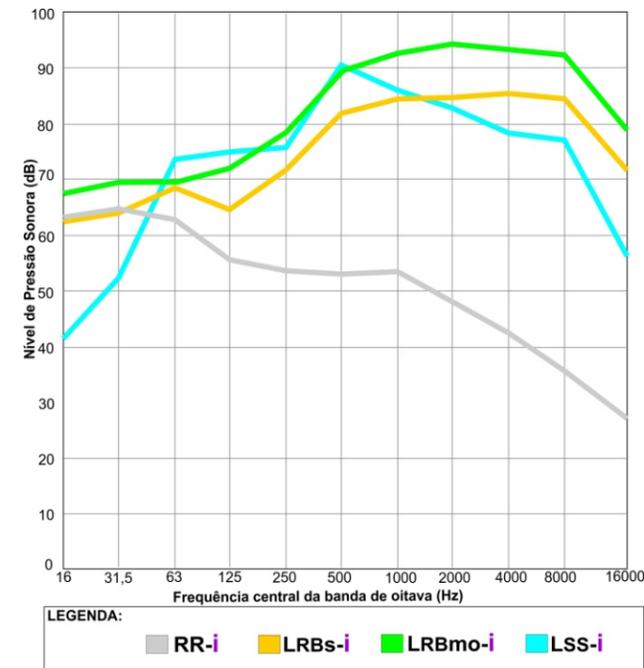
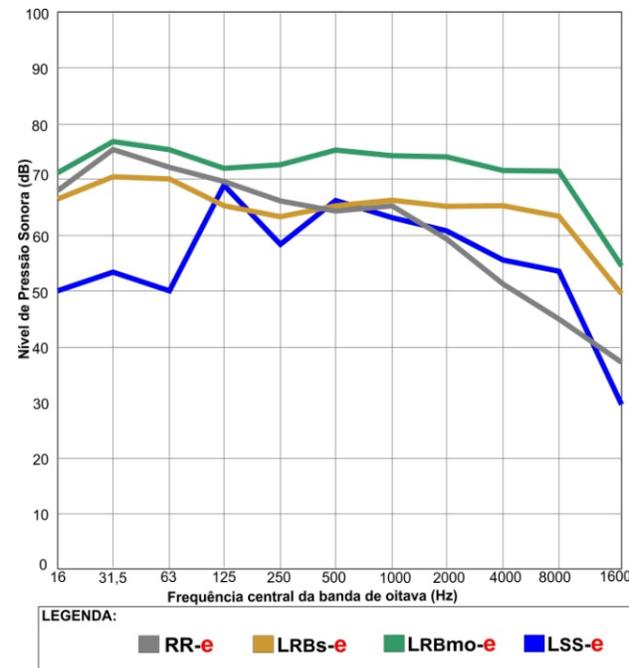
$$= 10 \log (0,035 + 0,003)$$

$$= 10 \log 0,038$$

$$= 10 \times -1,42 = -14,2 \text{ dB}$$

## Leq interno e externo - Fase 2

Leq (dB)	Frequências (Hz)											Leq Global (dB)	Diferença de nível (D)
	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k		
<b>RR-i</b>	62,7	64,3	62,7	55,5	53,7	53	53,5	47,4	41,8	35,1	26,4	<b>68,8</b>	<b>9,9dB</b>
<b>RR-e</b>	67	75,2	72	69,4	65,9	64,3	65,5	58,7	50,4	44,2	37,1	<b>78,7</b>	
Contabilidade média de veículos: 3 carros e 1 moto / ponto													
<b>LRBs-i</b>	62,4	63,8	68,6	64,3	71,9	81,9	84,7	84,4	85,3	84,4	71,2	<b>91,4</b>	<b>14,8dB</b>
<b>LRBs-e</b>	66,1	70,2	69,8	65,5	63,4	65,3	66,2	65,1	65,3	63,2	49,2	<b>76,6</b>	
Contabilidade média de veículos: 3,8 carros e 1,4 moto / ponto													
<b>LRBmo-i</b>	66,7	69,6	69,3	71,9	78,5	89,6	92,6	94,1	93,1	92,1	78,4	<b>99,6</b>	<b>15,9dB</b>
<b>LRBmo-e</b>	70,8	76,7	75	71,9	72,2	75,3	74,1	74,2	71,6	71,2	54,2	<b>83,7</b>	
Contabilidade média de veículos: 3,8 carros e 1,4 moto / ponto													
<b>LSS-i</b>	40,6	52,1	73,5	74,8	75,8	90,3	85,3	82,4	78	76,7	55,9	<b>92,5</b>	<b>20,3dB</b>
<b>LSS-e</b>	49,7	53,1	50	68,9	58,5	65,9	63,2	60,7	55,3	53,1	29,7	<b>72,2</b>	
Contabilidade média de veículos: 2,6 carros e 1 moto / ponto													



# APÊNDICE 6: Síntese dos resultados dos arranjos

Absorção alcançada para TR60 de 1,2s: 1208 Sabines (500Hz)

20 combinações plausíveis utilizando toda a área possível de aplicação do painel acústico

LIMITES POR SUPERFÍCIE INTERNA	
Teto (200m <sup>2</sup> - 100%)	
Parede A (30m <sup>2</sup> - 15%)	
Parede B (50m <sup>2</sup> - 25%)	
Parede C (30m <sup>2</sup> - 15%)	
Parede D (50m <sup>2</sup> - 25%)	

Teto 0%  
**NÃO ATENDE**  
 Área total não chega a 200m<sup>2</sup>

**GRUPO 1**

**Teto 100%** (200m<sup>2</sup>)

- Parede A 0
- Parede B 0
- Parede C 0
- Parede D 0

**Teto 85%** (170m<sup>2</sup>)

- Parede A 15% (30m<sup>2</sup>)
- Parede C 15%

**Teto 75%** (150m<sup>2</sup>)

- Parede B 25% (30m<sup>2</sup>)
- Parede D 25%

**Teto60%** (120m<sup>2</sup>)

**GRUPO 2**

- Início**
  - Parede A 15%
  - Parede C 15%
  - Parede B 25%
  - Parede D 25%
- Centro**
  - Parede A 15%
  - Parede C 15%
  - Parede B 25%
  - Parede D 25%
- Final**
  - Parede A 15%
  - Parede C 15%
  - Parede B 25%
  - Parede D 25%

**Teto20%** (40m<sup>2</sup>)

**GRUPO 3**

- Início**
  - Parede A 15%
  - Parede B 25%
  - Parede C 15%
  - Parede D 25%
- Centro**
  - Parede A 15%
  - Parede B 25%
  - Parede C 15%
  - Parede D 25%
- Final**
  - Parede A 15%
  - Parede B 25%
  - Parede C 15%
  - Parede D 25%

**GRUPO 1**

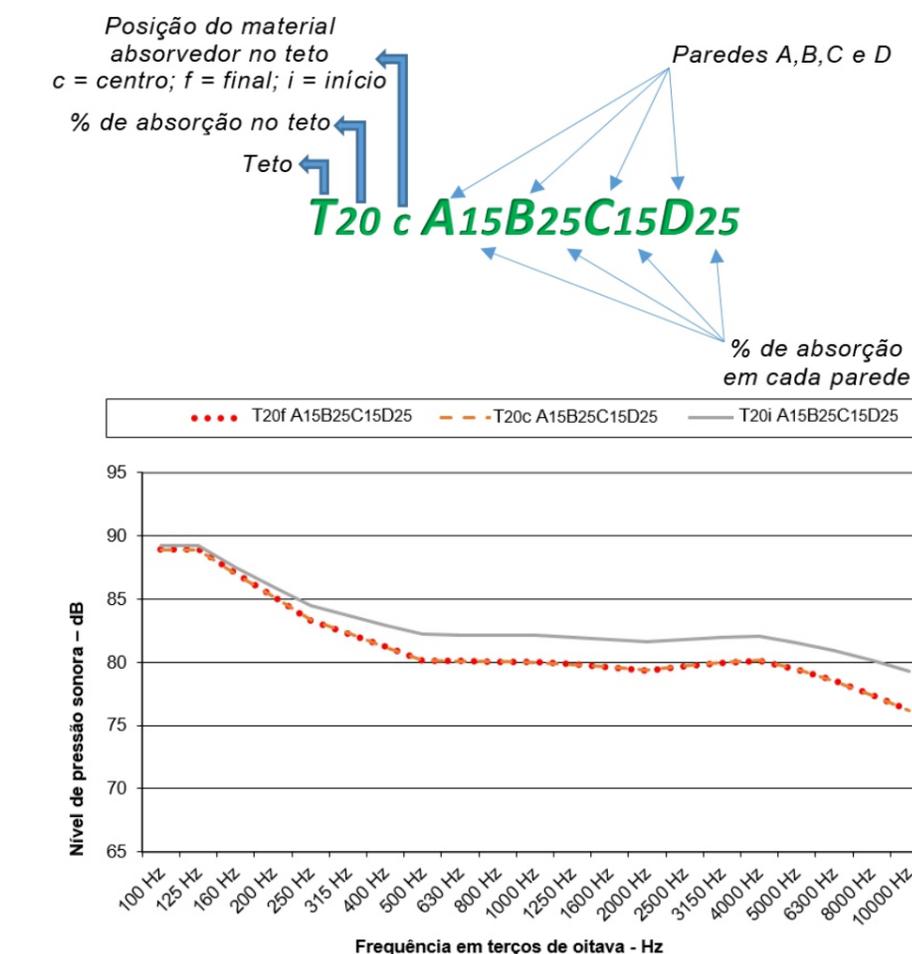
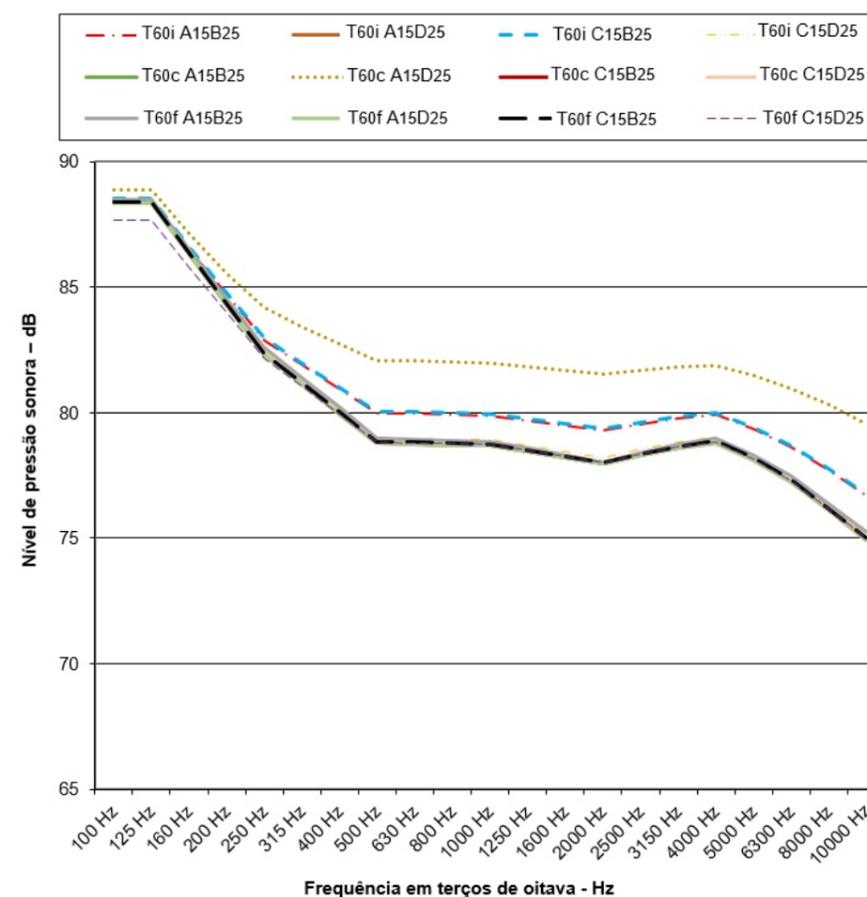
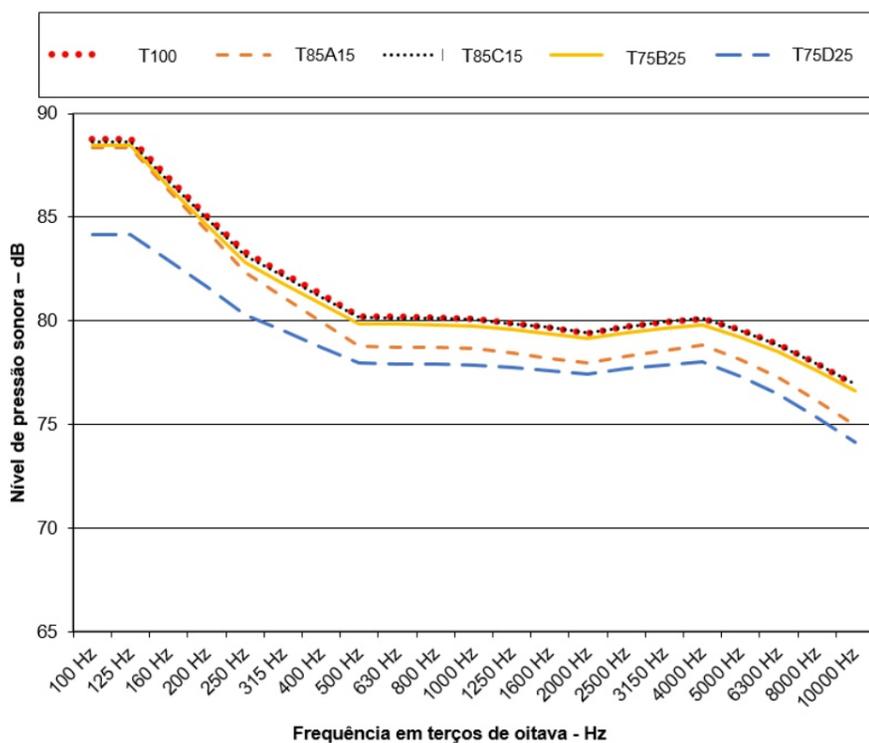
- 1 T100
- 2 T85 A15
- 3 T85 C15
- 4 T75 B25
- 5 T75 D25

**GRUPO 2**

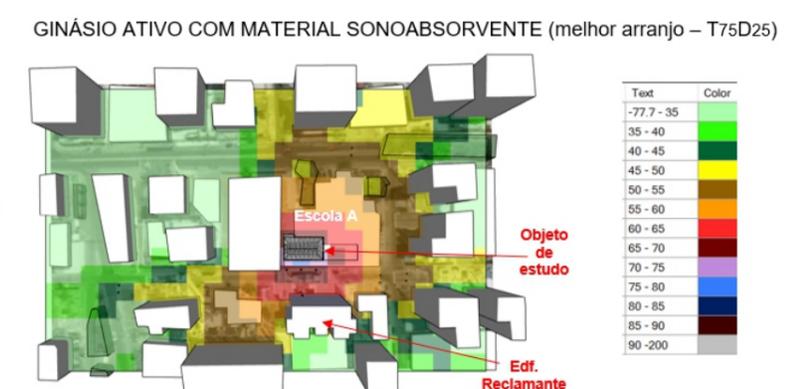
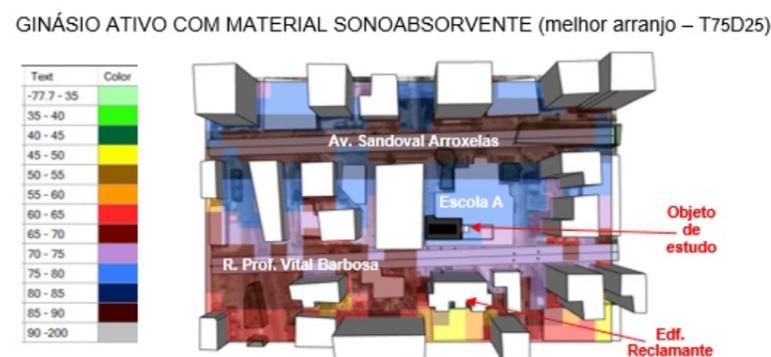
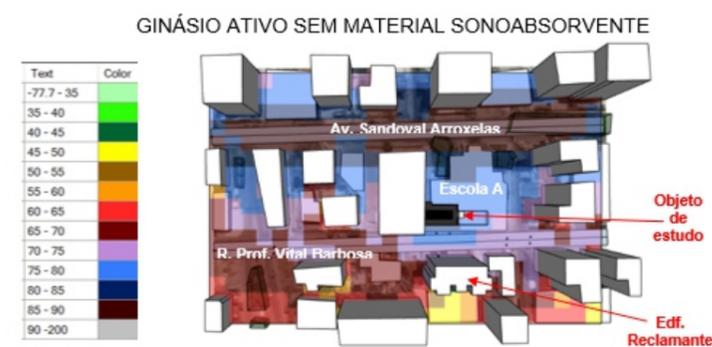
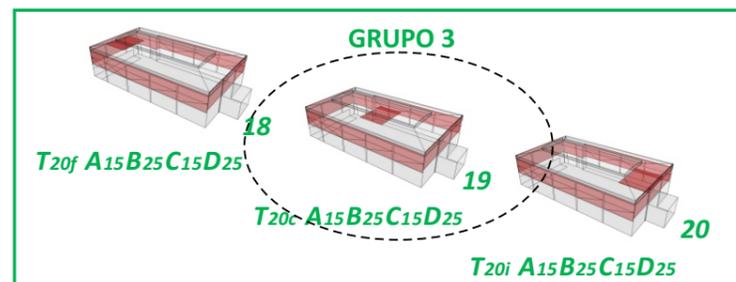
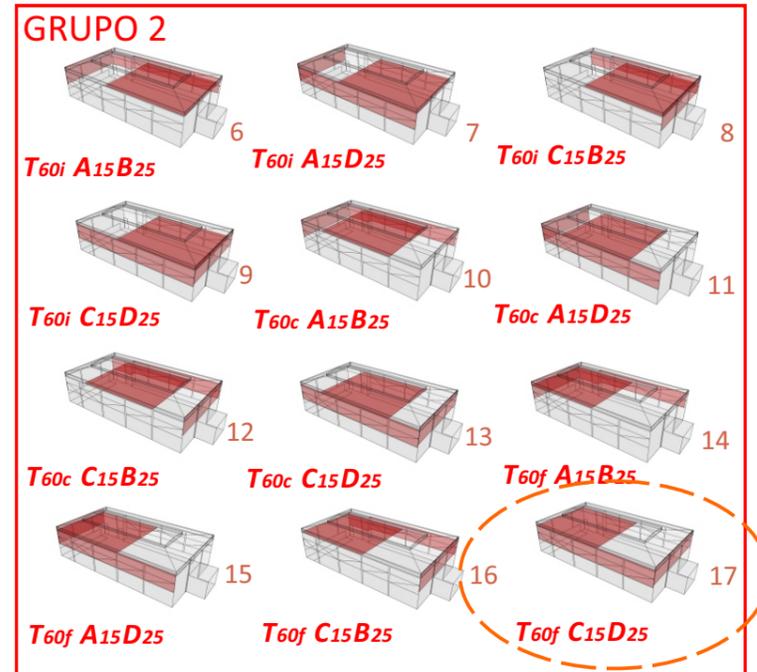
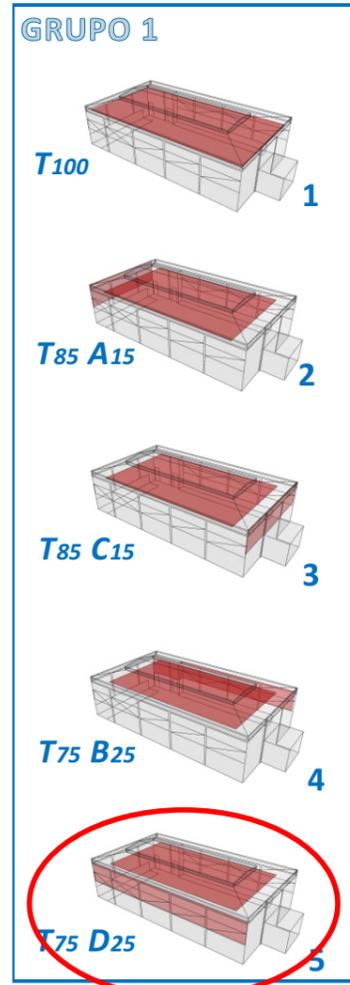
- 6 T60i A15B25
- 7 T60i A15D25
- 8 T60i C15B25
- 9 T60i C15D25
- 10 T60c A15B25
- 11 T60c A15D25
- 12 T60c C15B25
- 13 T60c C15D25
- 14 T60f A15B25
- 15 T60f A15D25
- 16 T60f C15B25
- 17 T60f C15D25

**GRUPO 3**

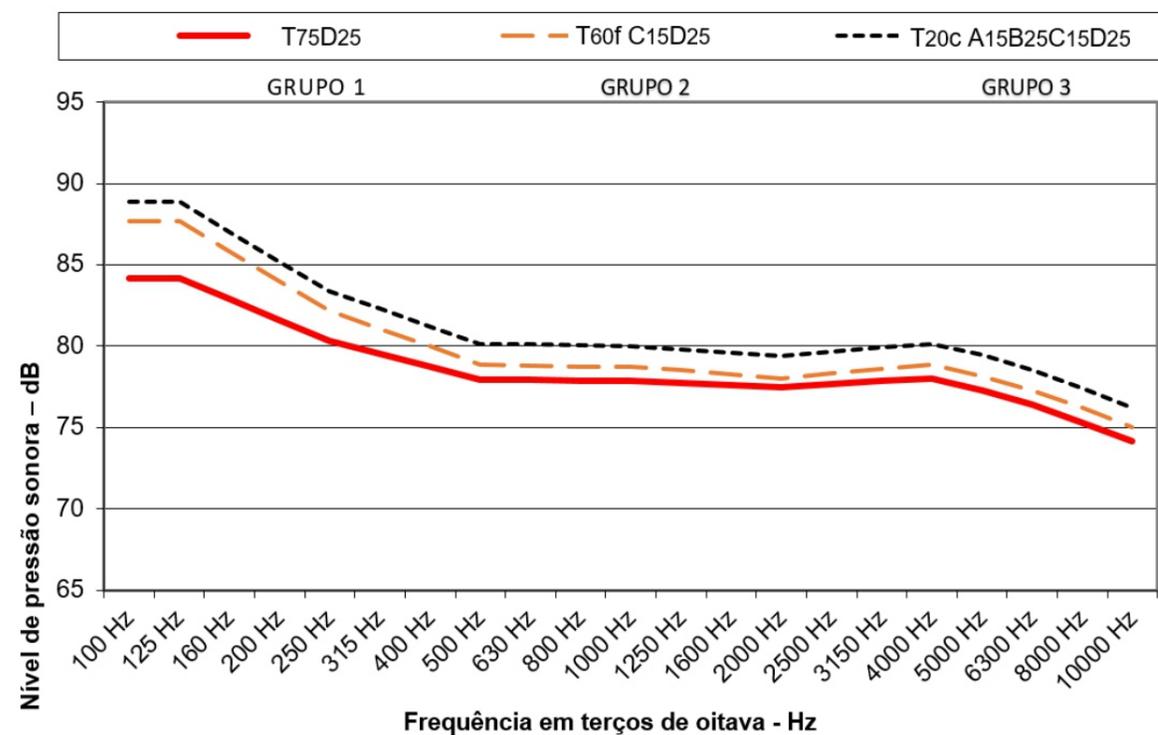
- 18 T20f A15B25C15D25
- 19 T20c A15B25C15D25
- 20 T20i A15B25C15D25



# APÊNDICE 7: Síntese dos resultados dos arranjos



Fonte: O Autor (2018).



Leq	Frequências (Hz)											Leq (dB)
	16	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	16k	
Medição Ruído Branco (Sonômetro)	63,7	65,5	69,8	68,2	73,5	84,3	87,4	84,6	84,2	82,6	69,0	92,1
Medição Ruído Branco (Mic. Omni.)	64	67,8	70,1	71,8	77,4	89,6	90,4	89,9	88,4	86,7	78,4	96,3
Medição Sinal Sweep (Mic. Omni.)	50,5	56,7	65,7	75,9	73,1	87,3	88,8	85,8	82,9	79,5	61,9	93,1
Simulação	0	0	0	93,7	93,4	93,2	92,8	93,1	89,7	92,4	0	101,2
<b>T75D25</b>	0	0	0	88,6	85,3	83,0	82,6	82,4	82,5	80,2	0	92,8

