

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
NÍVEL MESTRADO**

FABIANO SILVA SOARES

**AVALIAÇÃO DO USO DE BARREIRA ACÚSTICA PARA ESCOLAS MUNICIPAIS
EM PORTO ALEGRE**

São Leopoldo

2018

FABIANO SILVA SOARES

AVALIAÇÃO DO USO DE BARREIRA ACÚSTICA PARA ESCOLAS MUNICIPAIS
EM PORTO ALEGRE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Fernanda de Oliveira

São Leopoldo

2018

S676a Soares, Fabiano Silva.
Avaliação do uso de barreira acústica para escolas municipais em Porto Alegre / por Fabiano Silva Soares. -- São Leopoldo, 2018.

117 f. : il., mapas color. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, São Leopoldo, RS, 2018.
Orientação: Prof^a. Dr^a. Maria Fernanda de Oliveira, Escola Politécnica.

1.Acústica arquitetônica. 2.Controle de ruído. 3.Poluição sonora. 4.Ruído – Medição. 5.Escolas municipais – Porto Alegre (RS). I.Oliveira, Maria Fernanda. II.Título.

CDU 72:534.84
37.057:534.84

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

FABIANO SILVA SOARES

AVALIAÇÃO DO USO DE BARREIRA ACÚSTICA PARA ESCOLAS MUNICIPAIS
EM PORTO ALEGRE

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS

Aprovado em 06 de julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Bernardo Fonseca Tutikian – Unisinos

Daniel Reis Medeiros – Unisinos

Stelamaris Rolla Bertoli – Unicamp

A meu pai Carlos Edmundo Licht Soares.

A meu irmão Rafael Silva Soares

A minha mãe Terezinha de Fátima Silva Soares,

A minha esposa Tais Copetti Fraga

A meu filho Lucas Copetti Soares, por ser a minha fonte infinita de inspiração.

AGRADECIMENTOS

Ao itt Performance, pela contribuição técnica e teórica na realização desta dissertação.

A ACOEM Brasil, representante da DATAKUSTIK do Brasil pelo fornecimento da licença do software CadnaA® Standard BMP.

À minha orientadora pela atenção, dedicação e principalmente por ter me guiado ao conhecimento da acústica em um caminho de propagação em área livre, superando inclusive, algumas barreiras.

As diretoras Janize Duarte Teixeira (EMEI Jardim Camaquã) e Cláudia Machado Bittencourt (EMEI Unidos da Paineira) pela atenção dedicada e receptividade, que muito contribuíram para a realização dos ensaios de campo nas escolas que são objetos de estudo deste trabalho.

Aos moradores vizinhos destas escolas que permitiram o acesso a seus lares e demonstraram compreensão e entendimento da relevância do trabalho.

A Secretaria Municipal de Educação de Porto Alegre por fornecer as informações técnicas e materiais e ser um campo fértil para pesquisas no âmbito do conforto acústico.

Aos amigos e colegas que de maneira direta ou indireta contribuíram para a sequência do trabalho.

A minha família pela compreensão e incentivo dado nos momentos mais críticos.

“Faça o teu melhor, na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores, para fazer melhor ainda!”

Mário Sérgio Cortella

RESUMO

O crescimento desordenado das cidades tem aumentado significativamente a poluição sonora, ao mesmo tempo que ocasionam desgaste nas relações entre vizinhos, prejudicando o bem-estar da comunidade. Uma das alternativas utilizadas para reduzir estes efeitos são as barreiras acústicas, visto que se configuram numa das soluções mais eficazes para a redução da propagação do som em área livre. Neste panorama, a escola sempre foi tratada como receptora sensível, sendo raramente considerada emissora do ruído, em virtude deste fato é que a dissertação se desenvolve. Desta forma, neste trabalho é proposta a utilização de barreiras acústicas como forma de solucionar a livre propagação do som emitido durante atividades de recreação em duas unidades educacionais do município de Porto Alegre. O principal problema consiste em se reduzir os níveis de pressão sonora incidente nas edificações vizinhas, afim de garantir o atendimento aos níveis estabelecidos pelas normas ABNT NBR 10151 e 10152. Por ser fundamentado em situações reais, o estudo de caso envolveu levantamentos de campo dos espaços físicos das escolas e das residências vizinhas, ensaios em laboratório para determinação do coeficiente de absorção sonora, ensaios em campo para a determinação dos níveis de pressão sonora emitidos pelas crianças nas escolas. As medições em campo indicaram que os níveis sonoros internos nas residências vizinhas e externos nos playgrounds estão acima dos indicados pelas normas. Para a sequência do trabalho, foi desenvolvido um protótipo de barreira sonora, utilizando conceitos de reflexão sonora e absorção, tal como um ressonador de Helmholtz e após, ensaiado em laboratório. Com os dados obtidos nos ensaios laboratoriais da amostra, se obteve um coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) de 0,7. O *software* CadnaA[®] foi a ferramenta utilizada para a realização de simulação dos projetos das barreiras acústicas em ambas escolas, sendo demonstrada uma redução de 15 dB para a escola Jardim Camaquã e 5 dB para a escola Unidos da Paineira, sendo que a utilização do acabamento de topo com inclinação apresentou redução significativa apenas na escola Jardim Camaquã. A proposta da inserção das barreiras sonoras se mostrou relevante, mas ainda assim, não atingiu os valores determinados pelas normas.

Palavras-chave: Barreira Acústica. Ruído Ambiental. Conforto Acústico.

ABSTRACT

The disorderly growth of cities has contributed to a significant increase of noise pollution, at the same time as it causes frictions between neighbors, jeopardizing the well-being of communities. One of the alternatives used to reduce these effects is the adoption of acoustic barriers, since it is one of the most effective solutions to reduce the propagation of sound in open space. In the scenario, the school has always been seen as a sensitive receptor, and hardly ever considered a sound emitter, and this is the research subject of the present dissertation. Therefore, this work proposes to discuss the use of acoustic barriers as a way to solve the free propagation of emitted sound during recreation activities in two educational facilities in the city of Porto Alegre. The main problem consists in reducing the levels of sound pressure that reach neighboring buildings, as a way to guarantee the observance of levels established by the Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT – Brazilian Association of Technical Norms) in the norms NBR 10151 and 10152. As it was grounded in real situations, the case study involved field surveys to assess school and neighboring building physical spaces, laboratory tests to determine the sound absorption coefficient, and field tests to determine the levels of sound pressure emitted by children at the schools. The field tests showed that noise levels inside the neighboring buildings and outside on the playgrounds were above the ones established in the norms. For the continuity of the study, a sound barrier prototype was built, using concepts of noise reflection and absorption, as the Helmholtz resonator, and then tested in laboratory. According to the results obtained with the sample, a weighted sound absorption coefficient (α_w) of 0.7 was obtained. The CadnaA® software was the tool used to conduct simulations of sound barrier projects in both schools. A reduction of 15 dB was demonstrated at Jardim Camaquã School, whilst a 5 dB reduction was demonstrated at Unidos da Paineira School, being that the use of inclined top finish only represented significant reduction at Jardim Camaquã School. The use of sound barriers was proved relevant, but even so the levels established by norm were not reached.

Key-words: Acoustic Barriers. Environmental Noise. Acoustic Comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa da cidade de Porto Alegre e a localização das escolas nas diversas regiões do município	19
Figura 2 - Curvas isofônicas.....	25
Figura 3 – Gráfico das curvas de avaliação de ruídos (NC).....	28
Figura 4 – Representações de fonte pontual (a) e fonte linear (b)	32
Figura 5 - Fenômenos que ocorrem em uma barreira acústica.....	34
Figura 6 – Difração no topo da barreira cria a zona clara e de sombra.....	35
Figura 7 – Representação gráfica dos parâmetros para a definição do número de Fresnel	36
Figura 8 – Curva de Maekawa de redução sonora em função do número de Fresnel	36
Figura 9 – Ressonador de Helmholtz	38
Figura 10 – Parâmetros necessários para o cálculo do coeficiente de perfuração. ..	40
Figura 11 – Modelos de barreira acústica feita por muro de tijolos (a) e combinação de muro e talude em (b)	42
Figura 12 – Dimensionamento da barreira acústica relativa à altura.....	44
Figura 13 – Possibilidades de acabamento de topo nas barreiras sonoras	45
Figura 14 – Exemplos de inclinação de barreiras.....	46
Figura 15 – Relação da distância D com a regra 4D para projeto de dimensionamento do comprimento da barreira	47
Figura 16 – Variação da regra 4D, onde o ângulo de 80° projetado em relação os flancos laterais da barreira define seu comprimento	47
Figura 17 – Dimensionamento da extensão de uma barreira a partir do ângulo de 160°	48
Figura 18 – Exemplo de inclinação das bordas laterais da barreira	48
Figura 19 – Exemplos de barreiras acústicas: estrutura metálica e fechamento translúcido (a), fechamento transparente (b), talude com vegetação (c) e pedras (d)	50
Figura 20 - Vista aérea da localização da escola	53
Figura 21 – Vista do acesso da EMEI Jardim Camaquã	54
Figura 22 - Vista aérea com a localização da escola e da residência vizinha	54
Figura 23 – Foto da fachada da residência vizinha à EMEI Jardim Camaquã e identificação das janelas da sala de estar	55

Figura 24 – Foto com a localização do playground e a residência vizinha.....	55
Figura 25 – Corte esquemático da fachada da residência que está voltada para o playground da escola	56
Figura 26 – Planta de situação com a localização da escola na malha urbana	56
Figura 27 – Vista do acesso da EMEI Unidos da Paineira	57
Figura 28 – Vista aérea com a identificação do prédio vizinho.....	57
Figura 29 – Corte esquemático da relação entre o edifício vizinho e o playground da EMEI Unidos da Paineira	58
Figura 30 – Foto do playground com o prédio vizinho ao fundo.....	58
Figura 31 – Vista externa da fachada do edifício vizinho à EMEI Unidos da Paineira .	59
Figura 32 – Analisador Sonoro utilizado para as medições acústicas.....	60
Figura 33 – Localização dos pontos de medição (a) na área de playground na EMEI Jardim Camaquã e (b) no ambiente interno da residência vizinha.....	62
Figura 34 – Fotos da posição do medidor sonoro na sala de estar da residência.....	63
Figura 35 – Fotos dos aparelhos de medição acústica para as áreas externas.....	64
Figura 36 – Localização dos pontos de medição (a) na área de playground na EMEI Unidos da Paineira e (b) na sala de estar do apartamento da edificação vizinha (b)	64
Figura 37 – Foto com a localização do imóvel onde foram realizadas as medições internas.....	65
Figura 38 – Fotos dos aparelhos de medição na área externa do condomínio.....	66
Figura 39 - Imagem explodida do painel acústico que configuram a barreira.	67
Figura 40 - Detalhe arquitetônico da barreira acústica e especificações	67
Figura 41- Imagem explodida da barreira acústica	68
Figura 42 – Implantação do projeto arquitetônico do playground da EMEI JC.....	69
Figura 43 - Perspectivas ilustrativas do projeto da barreira acústica e do playground da escola JC.....	69
Figura 44 – Implantação do projeto da barreira acústica do playground da escola UP..	70
Figura 45 - Perspectivas ilustrativas do playground e barreira acústica da escola UP	71
Figura 46 - Perspectiva do protótipo da barreira acústica e suas camadas de composição	72
Figura 47 – detalhe da chapa de latão perfurada.....	72
Figura 48 – Esquema da instalação do poste de ligação entre os painéis para a realização do ensaio.....	76
Figura 49 – Foto da câmara reverberante do itt performance da Unisinos	76

Figura 50 – Etapas de montagem da amostra na câmara reverberante	77
Figura 51 – Posicionamento da fonte sonora no interior da câmara reverberante	78
Figura 52 - Janela de inserção dos dados para a configuração dos cálculos de ruído ambiental	79
Figura 53 - Janela de configuração dos dados relativos aos emissores, sendo (a) para a escola JC e (b) para a escola UP.....	80
Figura 54 - Janela de configuração dos espectros sonoros dos emissores na escola JC (a) e escola UP (b)	80
Figura 55 - Janela de configuração dos dados relativos aos receptores na escola JC (a) e escola UP (b)	81
Figura 56 – Janela de configuração de inserção da barreira acústica na escola JC (a) e UP (b)	82
Figura 57 – Comparação entre o NPS mais elevado medido na escola JC com o NPS diurno preconizado pela NBR 10151 (2003)	84
Figura 58 - Espectro sonoro do ponto E1P4	86
Figura 59 – Espectro sonoro do ponto E1P5.....	86
Figura 60 – Espectro sonoro do ponto E1P6.....	87
Figura 61 – Comparação entre o NPS mais elevado medido na escola UP com o NPS diurno preconizado pela NBR 10151 (2003)	89
Figura 62 – Espectro sonoro do ponto de medição E2P3	90
Figura 63 – Espectro sonoro do NPS do ponto E2P4	91
Figura 64 – Ponto E2P5 representado pelo seu espectro sonoro	91
Figura 65 – Coeficiente de absorção sonora (α_s) da amostra com e sem o material fonoabsorvente.....	94
Figura 66 - Curva de referência para avaliação do coeficiente de absorção sonora.	95
Figura 67 – Vista superior da simulação acústica da escola JC sem a barreira sonora.	97
Figura 68 – Estimativa de ruído da fachada da residência vizinha.....	97
Figura 69 – Corte esquemático	98
Figura 70 – Vista superior da simulação acústica da escola UP sem a barreira acústica	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correções da curva de ponderação A em bandas de frequência.....	26
Tabela 2 - Níveis de critérios de avaliação para ambientes externos em L_{Aeq}	29
Tabela 3 – Valores de referência para ambientes internos de edificações com usos diversos, segundo a NBR 10152.....	30
Tabela 4 – Siglas adotadas para as escolas.....	53
Tabela 5 – Identificação dos pontos internos e situação das janelas.....	63
Tabela 6 – Identificação dos pontos internos no apartamento 236	65
Tabela 7 - Estratégias utilizadas para a simulação acústica nas áreas de playground em ambas escolas.....	81
Tabela 8 – Temperatura e umidade relativa das medições externas.....	83
Tabela 9 - Dados das medições acústica externas da escola JC	83
Tabela 10 – Resultados das medições internas na residência vizinha à escola JC..	85
Tabela 11 – Resultados das medições internas na residência vizinha à escola JC..	85
Tabela 12 – Classificação das curvas NC dos espectros sonoros dos pontos internos da residência vizinha à escola JC	87
Tabela 13 – Registro das umidades relativas e temperatura para os pontos externos medidos na escola UP.....	88
Tabela 14 – Níveis de pressão sonora medidos externamente na escola UP	88
Tabela 15 – Temperatura e umidade relativa do ar nas medições internas na residência vizinha à escola UP.....	89
Tabela 16 – NPS medidos na sala de estar do vizinho da escola UP.....	90
Tabela 17 - Classificação das curvas NC dos espectros sonoros dos pontos internos da residência vizinha à escola UP.....	91
Tabela 18 - Registro da temperatura e umidade relativa do ar na câmara reverberante	92
Tabela 19 – Tempos de reverberação medidos: TR1, TR2 e TR3.....	92
Tabela 20 – Coeficiente de absorção sonora do protótipo	93
Tabela 21 – Valor do coeficiente prático de absorção sonora por faixa de frequência	95
Tabela 22 – Estratégia de simulação acústica em ambas escolas	96
Tabela 23 – Comparação entre a inserção da barreira sonora com e sem acabamento de topo.....	98
Tabela 24 – Comparativo entre as três situações de simulação	100

Tabela 25 – Cálculo do acréscimo e supressão dos valores de NPS na relação entre a medição de campo e a simulação	101
Tabela 26 - Valores de NPS em ambas escolas, e a relação com os valores definidos pelas normas 10151, e 10152 para ambientes internos	101

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	24
Equação 2	35
Equação 3	38
Equação 4	40
Equação 5	40
Equação 6	43
Equação 7	74
Equação 8	75

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	20
1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO	20
1.4 OBJETIVOS	21
1.4.1 Objetivo Geral	21
1.4.2 Objetivos Específicos	21
1.5 Estrutura do Trabalho	21
2 A ESCOLA E O RUÍDO AMBIENTAL	23
2.1 CONFORTO ACÚSTICO	23
2.1.1 Caracterização do Som	23
2.1.2 Níveis de Pressão Sonora para Conforto Acústico	27
2.1.2.1 Curvas de Critério de Ruído (NC)	28
2.1.2.2 Avaliação de Ruídos em Áreas Externas e Internas	29
2.2 RUÍDO AMBIENTAL.....	30
2.2.1 Propagação do Som ao Ar Livre	30
2.2.2 Fontes Sonoras Pontuais e Lineares	31
2.2.3 Fenômenos de Reflexão, Absorção, Refração e Difração	33
2.2.4 Ressonador de Helmholtz	37
2.2.5 Pannel Perfurado	39
2.2.6 Barreiras Acústicas	41
2.2.6.1 Perda por Inserção (IL).....	42
2.2.6.2 Altura e Acabamentos de Topo	43
2.2.6.3 Largura e Acabamentos nos Flancos Laterais	46
2.2.6.4 Estética e Integração com o Entorno.....	48
3 MÉTODO	52
3.1 OBJETOS DE ESTUDO.....	52
3.1.1 EMEI Jardim Camaquã	53
3.1.2 EMEI Unidos da Paineira	56
3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES SONORAS.....	59
3.2.1 Medições Internas	60
3.2.2 Medições Externas	61

3.2.3 Escola Jardim Camaquã	62
3.2.4 Escola Unidos da Paineira	64
3.3 PROTÓTIPO DA BARREIRA ACÚSTICA	66
3.3.1 Painéis para as Barreiras Acústicas	66
3.3.1.1 Escola Jardim Camaquã	68
3.3.1.2 Escola Unidos da Paineira	70
3.3.2 Projeto do Protótipo dos Painéis Acústicos	71
3.3.3 Ensaio de Absorção Sonora	73
3.3.4 Simulação Computacional	79
4 RESULTADOS E DISCUSSAO	83
4.1 EMEI JARDIM CAMAQUÃ- JC.....	83
4.1.1 Medições Externas	83
4.1.2 Medições Internas	85
4.2 EMEI UNIDOS DA PAINEIRA- UP	87
4.2.1 Medições Externas	88
4.2.2 Medições Internas	89
4.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA EM CÂMARA REVERBERANTE	92
4.3.1 Amostra com e sem o Material Fonoabsorvente	93
4.4 SIMULAÇÃO ACÚSTICA NO SOFTWARE CADNAA®	96
4.4.1 EMEI Jardim Camaquã	97
4.4.2 EMEI Unidos da Paineira	99
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
REFERÊNCIAS	105
APÊNDICE A – PLANTA DOS PROJETOS ARQUITETÔNICOS DA EMEI JARDIM CAMAQUÃ	110
APÊNDICE B – PLANTA DOS PROJETOS ARQUITETÔNICOS DA EMEI UNIDOS DA PAINEIRA	113
APÊNDICE C – PLANTA DO PROJETO DO PROTÓTIPO	116

1 INTRODUÇÃO

Os elevados níveis de pressão sonora a que a população é submetida têm causado diversos problemas de saúde, e desgastes nas relações entre vizinhos. Este fator tem contribuído para um aumento exponencial da poluição sonora. Sendo assim, é necessário criar mecanismos que auxiliem na redução dos elevados ruídos, e que contribuam para a melhora da qualidade de vida das comunidades expostas às áreas sonoramente sensíveis.

1.1 JUSTIFICATIVA

A crescente migração da população para centros urbanos densamente povoados tem contribuído para o aumento populacional em nível mundial, acarretando no crescimento desordenado das cidades, e na elevação do ruído urbano. Estes fatores somados, tendem a agravar a situação, instigando assim, a busca por soluções que amenizem os problemas relacionados ao ruído. A exposição da população a elevados níveis sonoros poderá causar efeitos negativos em sua saúde, sendo manifestados em suas atividades cotidianas, tais como a comunicação, a concentração no trabalho, o lazer, o descanso, bem como na qualidade de vida em geral, que podem estar ou não relacionado a perdas auditivas (RODRIGUES, 2013; CARVALHO, 2010).

Sob a ótica psicoemocional ou patológica, as consequências negativas da exposição ao ruído pelos seres humanos estão comprovadas cientificamente. As doenças oriundas desta exposição se constituem num campo extenso de pesquisa, que incorpora aspectos genéticos, saúde física e saúde mental (PAIXÃO, 2002).

De acordo com a World Health Organization (WHO, 2011), a exposição ao ruído ambiental traz efeitos diversos a saúde. Portanto, a poluição sonora se caracteriza não só como um incômodo, mas também como uma preocupação com a saúde pública e ambiental. Este problema vem aumentando consideravelmente, tanto que a poluição sonora, depois da poluição da água, e do ar é o fator que mais prejudica a saúde humana em um número cada vez maior (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003 *apud* LACERDA et al., 2005). À época, a WHO afirmava que a poluição sonora era a terceira maior causa de problemas relacionados a saúde, mas em apenas oito anos, a poluição sonora passou a ser a segunda maior causa

de problemas de saúde pública, que segundo a World Health Organization (WHO, 2011), perde apenas para a poluição do ar.

Campos et al. (2003) definem a poluição sonora como a mais difundida forma de poluição na sociedade moderna, sendo a principal causa de surdez e enfraquecimento da capacidade auditiva (hipoacusia) em indivíduos adultos. Este fato gera um número crescente de reclamações quanto às questões relativas ao ruído urbano, especialmente no que tange ao número excessivo de veículos circulando pelas ruas, casas noturnas e até mesmo igrejas ou templos (CARVALHO, 2010).

Nessa perspectiva, as escolas municipais de Porto Alegre se inserem nas questões relativas à poluição sonora. Muitos estudos tratam das questões acústicas em salas de aulas, bibliotecas e refeitórios, buscando soluções para o conforto acústico em assuntos, como a inteligibilidade da fala, e a consequente falta de concentração dos alunos. Para Vasconcelos e Nakata (2013), a acústica em espaços educacionais é fator preponderante para a qualidade no ensino e na qualidade de vida dos alunos, podendo assim serem evitados problemas de saúde. Desta forma, um projeto de ambiente escolar que possua acústica adequada proporciona um melhor rendimento dos estudantes.

Dentro desta premissa, Bertoli (2001, p. 1),

A educação, a sala de aula e o ambiente escolar merecem estudos pormenorizados, atentos, críticos e permanentes. As condições acústicas das salas de aula precisam ser consideradas com responsabilidade, reconhecendo-se a sua influência real no processo de ensino aprendizagem, na educação e consequentemente na vida das pessoas.

Alguns estudos (PAIXÃO; SANTOS, 1995; SANTOS; SLAMA, 1993; SERRA; BIASONI, 1993; URA; BERTOLI, 1998 *apud* KOWALTOWSKI, 2011) indicam que os ruídos externos interferem nas atividades escolares, e esta situação está diretamente ligada ao planejamento, e localização da estrutura física da escola. A escolha de materiais de acabamento que atenuem as múltiplas reflexões sonoras, o uso de esquadrias com fechamentos adequados, a distância de fontes de ruído, e a adoção de recuos mínimos para uma adequada condição acústica são algumas estratégias que devem ser observadas pelo projetista.

A comunicação entre alunos e professores em uma sala de aula é necessária para que a criança possa ouvir, entender, e assimilar o que é dito, sendo que

elevados níveis de ruído prejudicam o desempenho dos estudantes e aumentam o desgaste dos educadores (KOWALTOWSKI, 2011; BERTOLI, 2001).

O elevado ruído afeta a habilidade das pessoas de ouvir sons de alta frequência, e mesmo que o indivíduo ainda possa ouvir os sons, a conversação poderá se tornar "abafada" e dificilmente ele entenderá o que está sendo dito (INDRIANTI et al., 2016).

Por ser amplamente estudada, a abordagem sobre ruídos internos no ambiente escolar é que se faz pertinente indagar sobre os ruídos causados pela escola em seu entorno; objeto principal desta dissertação; e o que eles podem desencadear, como por exemplo, o desgaste da relação com os vizinhos, que podem gerar embates jurídicos e ações mais enérgicas por parte da comunidade circundante. Outro fator que poderá ser consequência dos elevados níveis de pressão sonora é a desvalorização de imóveis próximos a escolas ruidosas, onde uma residência ou prédio comercial poderá sofrer uma degradação de seu valor venal por conta do ruído ambiental.

Para Hermann e Haddad (2005 *apud* RAMOS 2016), a presença ou ausência de alguns fatores, tais como violência, poluição do ar, poluição sonora e etc. pode interferir no conforto de quem demanda um imóvel e conseqüentemente no valor venal, especialmente de imóveis próximos à áreas com intensos ruídos. Entre os fatores econômicos que recebem impactos negativos ao excesso de ruído está à desvalorização de propriedades que estão localizadas perto de áreas ruidosas. Estudos desenvolvidos pela Agência Dinamarquesa de Proteção Ambiental (*Environmental Protection Agency*) demonstraram que casas expostas a estradas com mais de 55 dB perdem 1,6% de seu valor para cada decibel a mais que recebem (EC, 2006 *apud* González ; Calle, 2011). Em Seul, na Coréia do Sul, em estudo semelhante constatou-se que o aumento de 1 dB dos níveis de pressão sonora (NPS) causa uma desvalorização de 1,3% nos imóveis próximos a estradas, podendo chegar a 5% em casas mais próximas (KIM et al., 2007 *apud* GONZÁLEZ; CALLE, 2011).

Dentro desta perspectiva, e de acordo com Murgel (2007), as escolas são tratadas frequentemente como receptores sensíveis, mas também podem se caracterizar como uma fonte de ruído significativa, sendo comum em alguns casos se observar imóveis à venda localizados próximo de escolas infantis.

Na estrutura física, a Secretaria de Educação oferta cinco modalidades de escola:

- Escola Municipal de Educação Infantil (EMEI);
- Escola Municipal de Ensino Fundamental (EMEF);
- Escola Municipal de Educação Especial (EMEE);
- Escola Municipal de Ensino Médio (EMEM);
- Escola de Educação Básica (EMEB).

Ao todo, são 44 escolas infantis, 49 escolas fundamentais, quatro escolas especiais, uma de educação básica e uma escola de ensino médio.

Estas escolas em sua maioria estão implantadas em áreas urbanas com média e elevada densidade populacional, próximas às residências e, portanto, estão suscetíveis a se configurarem em emissoras de ruídos e prejudicarem a saúde dos moradores ao infringirem índices de conforto acústico.

1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

As atividades escolares podem gerar ruídos indesejados para as edificações vizinhas, causando desgaste na relação entre as partes. O uso de áreas de vivências e recreação localizadas próximas as residências contiguas poderão causar níveis de pressão sonora (NPS) bastante elevados, e assim comprometer o conforto acústico dos moradores vizinhos. Uma solução que se apresenta é o emprego da barreira acústica para mitigar o incômodo causado pela escola em seu entorno. Esta dissertação busca responder o seguinte problema de pesquisa: Qual a eficiência da barreira acústica para o controle do ruído emitido durante as atividades externas dos alunos em uma escola?

1.3 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho abordará as questões relacionadas à emissão do ruído causado pelas atividades em escolas municipais de Porto Alegre a seus vizinhos, e irá propor a atenuação nesses lugares por intermédio da inserção de uma barreira acústica. Neste estudo não serão contempladas soluções de isolamento acústico nos receptores, nem a alteração de layout nas escolas. Parte-se, portanto, de uma possibilidade de solução atualmente viável, considerando-se a possibilidade de

transformação de um elemento de divisa em recurso de controle de ruídos. Para delimitar o trabalho tendo em vista o elevado número de escolas; 99 ao todo; que compõe a RME, o estudo se dará em duas Escolas Municipais de Educação Infantil (EMEI's), assim identificadas:

- a) EMEI Jardim Camaquã;
- b) EMEI Unidos da Paineira;

Ambos os casos poderão se configurar em solução padronizada para locais que apresentam problemas semelhantes.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

Considerando-se o problema e a delimitação do tema deste trabalho, o objetivo geral é definido da seguinte forma:

Avaliar a eficiência de uma barreira acústica para a redução do ruído gerado nas atividades escolares em áreas externas nos ambientes residenciais vizinhos a duas escolas municipais de Porto Alegre – RS.

1.4.2 Objetivos Específicos

A partir da definição do objetivo geral são indicados os objetivos específicos, como forma de se caracterizar as particularidades do tema delimitado pertinentes a este trabalho. Logo, a presente dissertação terá como objetivos específicos:

- a) realizar a caracterização acústica durante as atividades nas áreas externas em termos de níveis de pressão sonora e componente espectral para a determinação da frequência predominante de emissão;
- b) desenvolver um protótipo de barreira acústica com base na frequência predominante do ruído;
- c) caracterizar os coeficientes de absorção do protótipo de barreira acústica.

1.5 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi estruturado em cinco capítulos de forma a fornecer um entendimento geral sobre o ruído ambiental e o conforto acústico, sendo realizado

um estudo de caso em duas escolas municipais infantis de Porto Alegre, buscando atender os objetivos definidos.

O Capítulo 1 é introdutório e trata das questões relativas ao ruído urbano, suas consequências na saúde humana e a forma como os elevados níveis de pressão sonora podem interferir no bom funcionamento de uma escola. Também é abordada a interferência que uma escola pode causar em sua comunidade, sendo esta tratada não mais como receptora de ruído, e sim como emissora. A definição do problema, bem como as delimitações do tema, e objetivos finalizam esta parte do trabalho.

No Capítulo 2 são abordadas questões relativas ao conforto acústico, as características do som, e as formas de avaliação dos níveis sonoros. A propagação sonora, bem como assuntos relativos a caracterização das fontes sonoras e fenômenos físicos que ocorrem em uma barreira acústica também são tratadas. Conceitos como os ressonadores de Helmholtz, e painéis ressonantes auxiliam na formação do conhecimento relativo a absorção sonora. Ao final deste capítulo é tratado os conceitos teóricos acerca das barreiras acústicas, sendo abordados questões relativas a estética e função, além de apresentar alguns modelos empregados pelo mundo.

O método é referido no Capítulo 3, e inicia apresentando as duas escolas objetos de estudo, situando-as na malha urbana da cidade. Na sequência, são apresentados os critérios de medição sonora externa e interna, bem como os limites dos níveis de pressão sonora preconizados pelas normas Brasileiras. Dando seguimento, o projeto das barreiras acústicas para ambas as escolas é explicitado, tendo como base os painéis modulados acústicos apresentados anteriormente, assim como a amostra do painel acústico utilizado para a realização do ensaio de absorção sonora em câmara reverberante, e as normas internacionais que orientam sobre este tipo de ensaio. Encerrando este capítulo, foi demonstrada a inserção de dados e os critérios utilizados para a simulação acústica no software CADNAA®, sendo baseados nos resultados dos ensaios de absorção, e do projeto arquitetônico das barreiras sonoras.

O Capítulo 4 apresenta os resultados das medições externas, e internas em ambas escolas, e os valores dos coeficientes de absorção sonora obtidos pelos ensaios em laboratório. Por fim, são demonstrados os resultados das simulações, e as estratégias traçadas para a realização desta etapa.

As considerações finais são apresentadas no Capítulo 5.

2 A ESCOLA E O RUÍDO AMBIENTAL

A poluição sonora é parte do cotidiano da vida urbana, e a complexidade de sua propagação, e de seu controle apresentam especificidades, conforme abordado no presente capítulo.

2.1 CONFORTO ACÚSTICO

O conforto acústico apresenta componentes subjetivos, mas pode ser abordado sob alguns aspectos de cunho conceitual.

2.1.1 Caracterização do Som

O som pode ser caracterizado por sua duração, quantidade, tonalidade ou conotação.

O som é um fenômeno físico que é produzido quando um elemento de origem; fonte sonora; começa a vibrar de uma determinada maneira. Em seguida, esta vibração é transmitida por um meio de propagação até chegar ao receptor, e então ser percebido. (LÓPEZ; MARTÍN, 2017).

Bistafa (2006) apresenta a definição do som como uma sensação produzida no sistema auditivo, como uma variação de pressão do ambiente que é detectável pelo sistema auditivo, e ruído como um som com conotação negativa, ou seja, desagradável. O ruído é uma mistura complexa de sons com diferentes frequências, costumeiramente associada ao incômodo. Podem ser originados da voz humana ou de máquinas, e ser composto por frequências agudas, e graves, podendo algumas vezes apresentar uma frequência predominante (MEISSER, 1973). Ainda de acordo com López e Martín (2017), ruído é qualquer som percebido, mas com características de indesejável, portanto, o ruído é qualquer som que cause irritação, ou seja, prejudicial ao receptor.

Para Patrício (2010), o som sempre fez parte da vida cotidiana, no entanto na sociedade atual, grande parte do som é percebido pelo receptor como desagradável, ou seja, como incômodo, e sem caráter informativo, sendo definido nestas circunstâncias como ruído. Complementa ainda que o ruído se apresenta como um “subconjunto” do som e que para esta evidência ser constatada, não basta apenas

as suas características físicas de frequência, amplitude e duração, mas também a atitude do receptor frente a percepção do som. Dentro desta perspectiva, Carvalho (2010) afirma, que mesmo subjetivo, ruído é considerado como todo o som indesejado.

Relacionado a duração, o ruído pode ser classificado em: contínuo, intermitente e impulsivo.

O ruído contínuo é originado do funcionamento ininterrupto de máquinas ou equipamentos, e a sua medição em um curto período pode ser suficiente para classificá-lo (NUNES; SATTLER, 2009). A descrição dada na NBR 16.313 (ABNT, 2014) para definição de ruído contínuo é aquele som presente em todo o período de observação, e com características diferentes do som impulsivo, e do som intermitente.

O ruído intermitente, de acordo com a ABNT (1990, *apud* NUNES, 2005, p.36),

[...] normalmente originado de impactos ou explosões, ocorre em um espaço de tempo bem menor, e sua energia sonora é concentrada. [...] o curto tempo de duração de um ruído de impacto é sua principal característica, pois sua duração deve ser inferior a 1 segundo, com intervalos maiores que 1 segundo.

A caracterização do som também pode ser feita com base na sua tonalidade, que apresenta uma relação direta com frequência, dada em hertz. O *Hertz* (Hz) é a unidade de medida da frequência de uma onda sonora, indica uma oscilação por segundo (MURGEL, 2007), e está relacionado com outras duas variáveis de comprimento de onda e velocidade de propagação no meio.

O comprimento de onda é representado pela letra grega λ (Equação 1), sua unidade é em metros, e expressa o início, e fim de um ciclo de uma onda sonora para uma determinada distância (BISTAFA, 2006, p. 20).

A relação entre a frequência e o comprimento de onda, a partir da velocidade do som é dado pela expressão:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Equação 1

Em que c é a velocidade do som, em metros por segundo;

λ é o comprimento de ondas em metros;

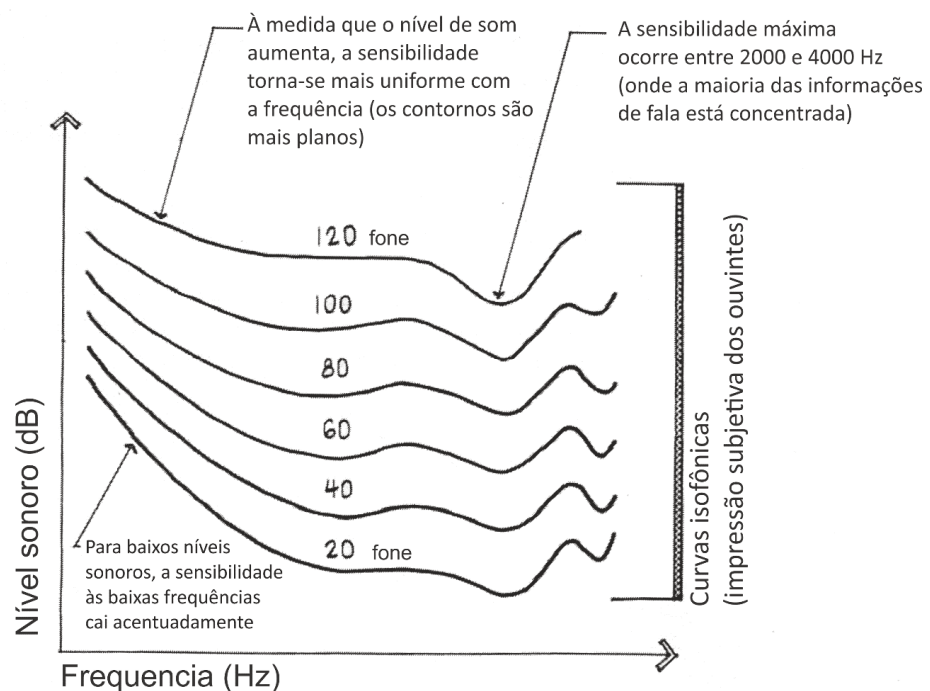
f é a frequência expressa em Hz.

O ouvido humano apresenta sensibilidades diferentes dentro da faixa audível entre 20 Hz e 20 kHz. De acordo com Patrício (2010), o ouvido humano apresenta maiores sensibilidades nas médias, e altas frequências do espectro sonoro, mais precisamente dos 1.000 Hz a 4.000 Hz. Segundo Bistafa (2006), o sistema auditivo dos seres humanos é mais sensível próximo à frequência de 3 KHz.

De acordo com Carvalho (2010), para as medições dos níveis de ruídos emprega-se o Decibel (dB), que representa a décima parte de um bel. Sendo um 1 B equivalente a 10 dB, pode se considerar este como a mínima variação da potência sonora perceptível pelo ouvido. Bel é uma unidade de intensidade física relacionada ao som. Recebe este nome em homenagem ao seu inventor, Alexander Graham Bell.

As regulamentações, regulações de demais instrumentos normativos, e jurídicos que discorrem sobre os efeitos do ruído em seres humanos utilizam a ponderação na escala A, pois é a que mais se aproxima da percepção do ouvido humano (BISTAFA, 2006). Egan (2014) informa que esta grandeza pode ser usada inclusive para prever a reação da comunidade aos diversos tipos de ruídos ambientais. Esta medida está baseada nas curvas isofônicas, conforme a Figura 02:

Figura 2 - Curvas isofônicas



Fonte: Adaptado de Egan (2014, p. 29)

Estas curvas foram criadas com o objetivo de mensurar de forma subjetiva a intensidade dos sons, sendo criada uma grandeza psicoacústica, chamada de nível de audibilidade. Assim, a Figura 2 apresenta um gráfico que representa os níveis de audibilidade em função da frequência, e do nível sonoro. A unidade de medida do nível de audibilidade é chamada de fone, portanto, as curvas são denominadas de curvas isofônicas (EGAN, 2014).

As curvas isofônicas demonstram condições de níveis de som, e frequência que os ouvintes percebem como sendo igualmente alto. Como as variações ocorrem de pessoas para pessoas, as curvas representam a média para diversos indivíduos. Os números destacados nas curvas da Figura 2 correspondem ao nível sonoro, ou fones. Portanto, os sons que são produzidos em baixa frequência serão os mesmos dos fones.

Segundo Murgel (2007), para a medição dos níveis de pressão sonora, o uso de equipamentos específicos é um componente básico. São chamados de medidores de nível sonoro, também conhecidos como sonômetro ou ainda decibelímetro. Ele tem a função de fornecer o nível de pressão sonora total de determinado som, relacionando a energia sonora distribuída em bandas de frequências, ou seja, o espectro sonoro. Complementando, López e Martín (2017), esclarecem que os filtros ponderados são utilizados para modificar o espectro sonoro e aproximar a sensação subjetiva de intensidade sonora, aquela percebida pelo ouvido humano. Estes filtros são classificados em A, B, C e D. Desta forma, é possível a utilização de um equipamento de medição sonora para a expressão da sensação auditiva humana utilizando-se um filtro com a ponderação A.

Para se chegar aos valores da curva de ponderação “A”, quando da inexistência de equipamento adequado para a medição do NPS de acordo com a gama de frequência em que os ruídos e sons ocorrem, aplicam-se os valores, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Correções da curva de ponderação A em bandas de frequência

Frequência em Hz	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Ponderação em A	- 26,2	- 16,1	- 8,6	- 3,2	0	+ 1,2	+ 1	-1,1

Fonte: Carvalho (2010, p. 47).

2.1.2 Níveis de Pressão Sonora para Conforto Acústico

O ruído causa incomodo nas pessoas individualmente ao prejudicar a concentração, a conversação, o lazer, o sono e as demais atividades rotineiras. No entanto, é possível caracterizar os efeitos destes ruídos em um grupo de pessoas em comunidades sujeitas a diversos tipos de ruído ambiental. Estudos apontam para uma significativa correlação entre os níveis de ruído e a interferência em comunidade (BISTAFA, 2006).

As pessoas reagem de maneiras diversas a um mesmo ruído. O ruído que causa desconforto em uma pessoa pode ser imperceptível para outra, não importando a sua intensidade, contanto que esteja na faixa audível do ouvido humano, mas uma pessoa demonstrará desagrado frente a este ruído por uma ou outra razão.

Diante deste fato, diversos estudos têm sido realizados com o intuito de determinar os efeitos causados nas pessoas pelos elevados NPS do tráfego de veículos, aéreos e ferroviários. Além destas três fontes sonoras, existem diversas atividades que perturbam as áreas residenciais, tais como: escolas, fábricas, subestações de energia elétrica, atividades comerciais, torres de resfriamento de equipamentos de ar condicionado, atividades de lazer, cultos religiosos, atividades esportivas, e outros. (BISTAFA, 2006; MURGEL, 2007).

Portanto, a reação da comunidade quanto ao ruído intrusivo poderá ser manifestada de diversas maneiras, de acordo com os NPS medidos.

No final de década de 1990 a World Health Organization (WHO, 1999) publicou algumas recomendações acerca da proteção contra o ruído. Os níveis-critério levaram em consideração as perturbações do sono e a inteligibilidade da fala, sendo estes níveis baseados em dados de laboratórios e campo, conforme elencado abaixo:

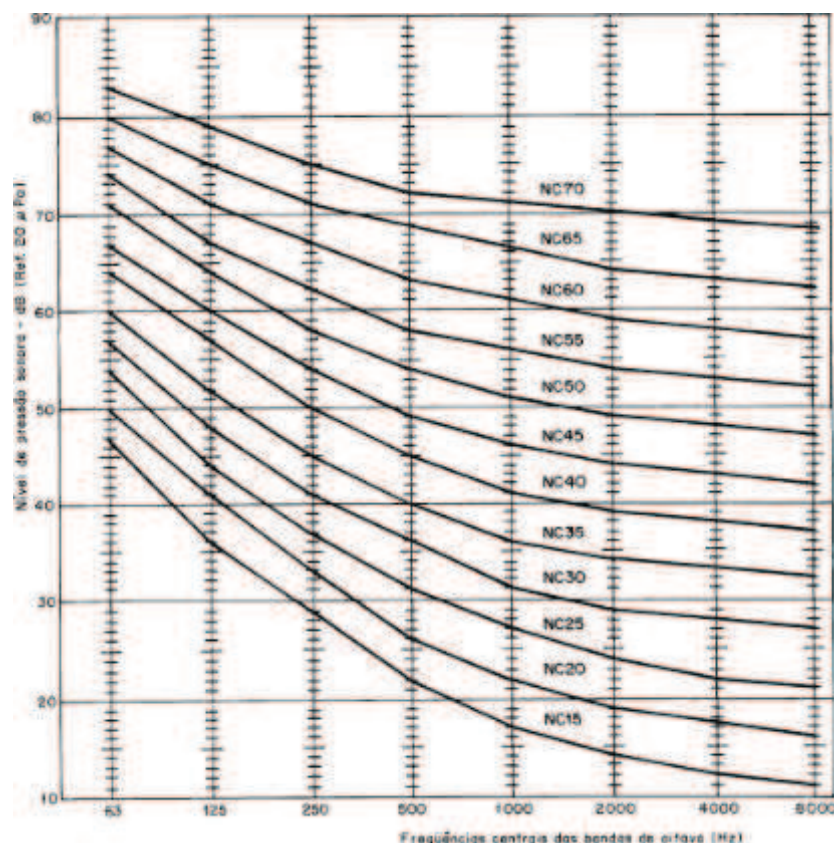
- nível-critério L_{Aeq} de 50 dB recomendado para que a grande parte das pessoas, não sejam moderadamente incomodadas pelo ruído;
- nível critério L_{Aeq} de 55 dB, em áreas habitadas durante o dia, em que se recomenda que a maioria das pessoas, não seja incomodada severamente pelo ruído;

- nível-critério L_{Aeq} de 45 dB, em áreas habitadas durante o período noturno, recomendado que o nível de 30 dB no interior dos dormitórios, não seja ultrapassado com as janelas abertas.

2.1.2.1 Curvas de Critério de Ruído (NC)

As Curvas de Critério de Ruído foram criadas no sentido de interpretar quantitativamente os níveis de ruídos em ambientes ocupados pelo homem. Cada curva associa o espectro sonoro em bandas centrais de oitava, nas frequências de 63 a 8.000 Hz, conforme demonstra a Figura 3. O método de avaliação destas curvas consiste em medir o nível de ruído em um ambiente qualquer, e plotar os níveis sonoros por banda central de oitavas sobre estas curvas. A curva imediatamente superior, ou seja, acima do nível plotado mais elevado é àquela que classifica o NPS medido (BISTAFA, 2006).

Figura 3 – Gráfico das curvas de avaliação de ruídos (NC)



Fonte: ABNT (1987, p. 3).

A NBR 10152 (2017) adota as curvas NC (*"noise criteria curves"*), além dos níveis de pressão sonora em dB, corrigidos no filtro de ponderação em A, para

estabelecer os critérios do conforto acústico em variados usos de ambientes internos.

2.1.2.2 Avaliação de Ruídos em Áreas Externas e Internas

A NBR 10.151 (ABNT, 2003) trata da avaliação de ruído em área habitadas, visando o conforto da comunidade, independente de reclamações. Estabelece ainda os critérios de medição dos NPS, e suas respectivas correções. Esta norma apresenta um quadro com os níveis-critérios de avaliação (NCA) para ambientes externos, a partir de medições em L_{Aeq} , assim especificados, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Níveis de critérios de avaliação para ambientes externos em L_{Aeq}

Tipos de Áreas	Diurno (dB)	Noturno (dB)
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Áreas 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: NBR 10151 (2003, p. 3).

Os valores apresentados pela Tabela 2 servem como parâmetros para as medições realizadas em L_{Aeq} , que deverá ser corrigido com +5 dB caso o ruído apresente características impulsivas ou de impacto, caso as características do som contenham tons puros, a este deverá ser acrescido + 5dB. Com estas correções, as medições dos NPS poderão ser comparadas com o nível-critério de avaliação (NCA).

A NBR 10152 (ABNT, 2017) fixa valores de referência para ambientes internos em função do uso do ambiente, que para uma sala de estar é de 40 dB, com uma margem de tolerância de 5 dB, com valores dentro do filtro de ponderação A. Na mesma norma, também são abordados os procedimentos de medição interna, item anteriormente tratado pela NBR 10151 (ABNT, 2003). Os parâmetros que devem ser observados são: nível de pressão sonora equivalente ponderado em A (L_{Aeq}), nível máximo de pressão sonora ($L_{ASmáx}$); este critério só poderá ser

considerado, caso a fonte sonora em estudo seja parte integrante da edificação, e o nível NC representativo de um ambiente (RLNC), para o método de avaliação detalhado. Caso se opte pelo método simplificado, exclui-se a análise do LNC. Sendo assim, a NBR 10152 (ABNT, 2017) apresenta os valores de referências para ambientes internos de uma edificação em conformidade com o seu uso estando estes dentro do filtro de ponderação em A. Para exemplificar, a Tabela 3 apresenta os critérios para ambientes residenciais.

Tabela 3 – Valores de referência para ambientes internos de edificações com usos diversos, segundo a NBR 10152

Finalidade de uso	Valores de referência		
	L _{Aeq} (dB)	L _{ASmáx} (dB)	RLNC
Residências			
Dormitórios	35	40	30
Salas de estar	40	45	35
Salas de cinema em casa (<i>home theaters</i>)	40	45	35

Fonte: adaptado de NBR 10152 (2017, p. 14).

Desta forma, para a avaliação sonora é considerado adequado para uso os níveis de pressão sonora representativos iguais ou inferiores aos valores da Tabela 4. A norma admite uma tolerância de até 5 dB para L_{Aeq} e L_{ASmáx}. Para RLNC é admitido 5 dB de tolerância.

2.2 RUÍDO AMBIENTAL

O ruído ambiental é um problema típico de áreas urbanizadas e as principais variáveis estão relacionadas ao ambiente de propagação e às fontes sonoras.

2.2.1 Propagação do Som ao Ar Livre

Para que o som se propague, são necessários três elementos fundamentais: a fonte sonora (emissor), o meio de transmissão e o receptor.

O som se propaga sobre um determinado meio (ar), compreensível pelo choque de moléculas que constituem este meio, originando variações de

velocidades nestas moléculas e em consequência, a flutuação da pressão existente (PATRÍCIO, 2010).

Para Bistafa (2006, p.201), a definição da propagação ao ar livre é apresentada desta forma:

Primeiramente, a fonte sonora emite uma certa potência sonora, gerando um nível sonoro que pode ser medido nas imediações da fonte. A partir daí o nível sonoro é atenuado à medida que o som se propaga, entre a fonte e o receptor, ao longo de determinada trajetória.

De acordo com López e Martín (2017), a fonte de som é uma perturbação mecânica inicial no meio, fazendo com que algumas partículas comecem a vibrar, movendo-se de sua posição inicial. Esta vibração é transmitida para as demais partículas vizinhas, fazendo que estas colidam entre si, e comecem também a vibrar. A cada colisão de partículas, a energia inicial é reduzida, acarretando em perda da intensidade da segunda em relação a primeira, e assim por diante.

2.2.2 Fontes Sonoras Pontuais e Lineares

Conforme Patrício (2010), a propagação sonora tem características geométricas de raios sonoros, sendo definidos por linhas que, em cada ponto, são normais a superfície de uma onda esférica.

Desta forma, Carvalho (2010, p. 25) “ afirma que a partir da fonte sonora, o som se propaga em todas as direções, segundo uma esfera. Entretanto, dependendo da fonte sonora, pode haver uma maior concentração de energia em um determinado sentido evidenciando-se, assim seu direcionamento”.

A propagação da onda ao ar livre, considerando-se as fontes típicas do meio urbano, pode ocorrer com dois tipos de fontes principais: a fonte pontual e a linear.

Segundo Bistafa (2006), a propagação da onda esférica é a mais representativa no nosso cotidiano, e é definida como fonte pontual (Figura 4 a). Uma fonte pontual é aquela que possui dimensões menores que a metade da distância entre a fonte e o receptor. Salaria ainda que as condições de propagação de diferentes partes da fonte sonora até o receptor devem ser essencialmente iguais.

Para as ondas esféricas, a forma geométrica destes pontos forma uma calota. Portanto, ao se duplicar a distância da fonte, ocorre um decréscimo de 6 dB no nível de pressão sonora (CARVALHO, 2010; EGAN, 2014).

Bistafa (2006) complementa que ao aumentar esta distância por um fator 10, acarretará em uma queda de 20 dB.

Para exemplificar os tipos de fontes pontuais típicas, pode-se citar as máquinas e equipamentos mecânicos, sirenes, descargas de gases e vapores na atmosfera, um grupo localizado, e bem definido de equipamentos de construção civil, e outros. (BISTAFA, 2006). Um ar condicionado, ou a fala de uma pessoa também podem ser consideradas como fontes pontuais (LÓPEZ; MARTÍN, 2017).

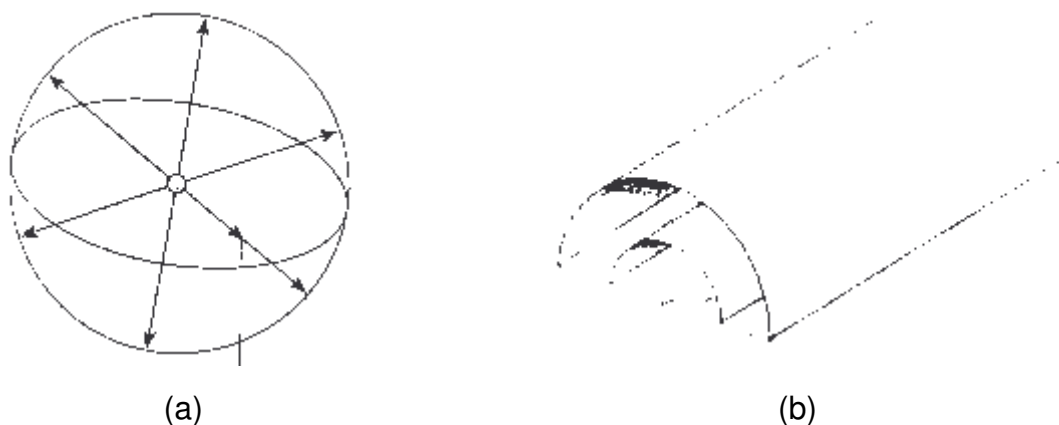
As fontes lineares “são tubulações por onde escoam gases de alta velocidades, e vias de tráfegos veiculares, como rodovias de alta velocidade com elevada densidade de trânsito” (BISTAFA, 2006, p. 41).

Para uma fonte linear (Figura 4 b), a propagação do som se dá de forma cilíndrica, ou seja, sucessivas fontes pontuais que se reforçam mutuamente (MURGEL, 2007; EGAN, 2014). Assim sendo, o decaimento do nível sonoro é menos intenso, ocorrendo uma perda de 3 dB a cada vez que se dobrar a distância da fonte sonora, e o receptor.

As fontes lineares podem ser compostas por diversas fontes pontuais, propagando-se no meio de forma cilíndrica, devido ao fato de serem alongadas em uma direção, e estreita em outra (BRÜEL; KJAER, 2001).

Uma rodovia, conforme Murgel (2007) é considerada fonte linear, mas com algumas ressalvas, pois o ruído não é contínuo e nem constante em toda a sua extensão, mas é gerado por fontes que se deslocam em uma mesma linha; a rodovia neste caso. Sendo assim, o ruído linear seria o residual de tráfego, que se apresenta de maneira constante no percurso da via. Já um automóvel isolado que passou em um determinado período teria características de fonte pontual.

Figura 4 – Representações de fonte pontual (a) e fonte linear (b)



Fonte: Bistafa (2006, p. 41).

Ao se propagarem em linha reta, as ondas sonoras sofrem um decaimento em função da distância do emissor, tendo a sua intensidade reduzida. Sabendo-se que o nível sonoro é reduzido de acordo com a distância, à medida que o som diverge da fonte sonora, podendo desta forma ser direcional. A absorção sonora do ar atmosférico reduz o som ao longo de seu percurso. As reflexões do solo podem interferir com a emissão direta do som, causando atenuação ou, em alguns poucos casos, amplificação. Áreas densamente compostas por árvores, barreiras artificiais e naturais acrescentam atenuação adicional ao som. Em contrapartida, o espalhamento do som pelas copas das árvores poderá reduzir a eficiência das barreiras (BISTAFA, 2006).

2.2.3 Fenômenos de Reflexão, Absorção, Refração e Difração

Na propagação do som em áreas externas ocorrem múltiplas reflexões, que são decorrentes, dentre diversos fatores, de determinadas características das superfícies, especialmente relacionadas à maior ou menor rigidez das faces expostas diretamente à incidência sonora (BISTAFA, 2006; KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Uma onda sonora ao se propagar no ar pode se deparar com um obstáculo, que é qualquer elemento que implique uma alteração nas propriedades do meio original e que afeta a propagação da onda sonora. Desta forma, ao colidir com este obstáculo, uma parte da energia transportada pela onda poderá ser refletida para o meio original de propagação, parte será absorvida pelo obstáculo e o restante seguirá seu caminho de propagação. Esses fenômenos são caracterizados como reflexão, absorção e refração do som (LÓPEZ; MARTÍN, 2017).

De acordo com López e Martín (2017), a reflexão do som ocorre quando a energia sonora incidente sobre o obstáculo é devolvida ao meio de propagação ao qual se originou. A quantidade de energia refletida irá depender das propriedades acústicas do elemento que causou a reflexão, das propriedades da onda incidente e de sua frequência. A onda refletida se propagará de volta ao meio de forma que seu ângulo de reflexão seja idêntico ao ângulo de incidência. Os materiais que apresentam superfícies rígidas são os que melhor refletem as ondas sonoras.

Ainda segundo os autores, quando a onda sonora se propaga por um meio, parte de sua energia é absorvida pelas moléculas que formam este meio. A

quantidade de energia absorvida depende, tanto das propriedades do meio quanto da composição espectral do próprio som.

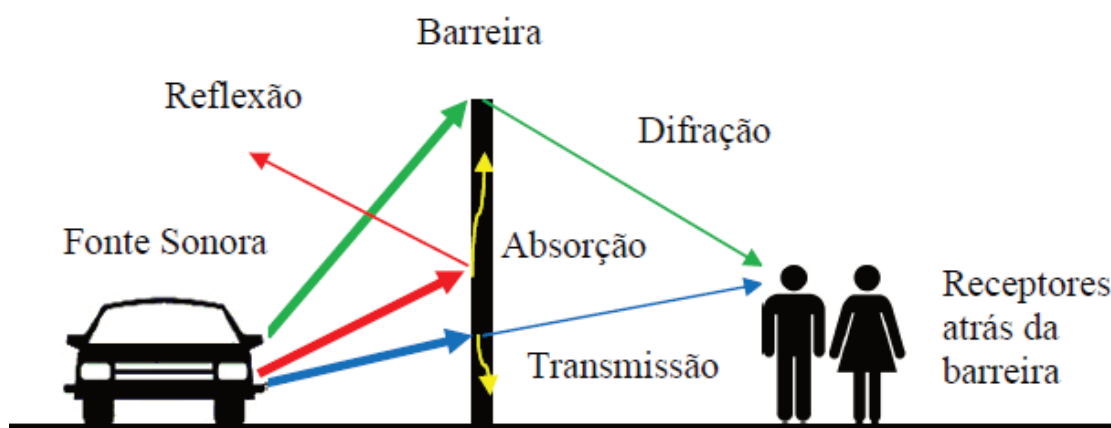
Para Carvalho (2010), a refração do som é a mudança de direção que uma onda acústica sofre quando passa de um meio de propagação para outro. Isto ocorre devido a variação acentuada da velocidade de propagação no meio.

De acordo com Bistafa (2006), a transmissão do som pela barreira é comumente ignorada, mas para isso, não deve possuir aberturas no seu contato com o solo, ou em sua face vertical. A densidade superficial do obstáculo acústico também é bastante relevante, pois quanto maior for, menor será a sua transmissão. Caso estes aspectos não sejam observados, a transmissão poderá ser bastante significativa, reduzindo a eficácia da barreira.

Outro fenômeno relevante é a difração do som que consiste na capacidade que uma onda sonora possui de transpor obstáculos localizados entre a fonte sonora e o receptor, mudando sua direção e reduzindo a intensidade sonora (CARVALHO, 2010).

A Figura 5 apresenta um desenho de um obstáculo acústico, e os fenômenos que ocorrem na onda sonora no caminho de propagação entre a fonte, e o receptor.

Figura 5 - Fenômenos que ocorrem em uma barreira acústica

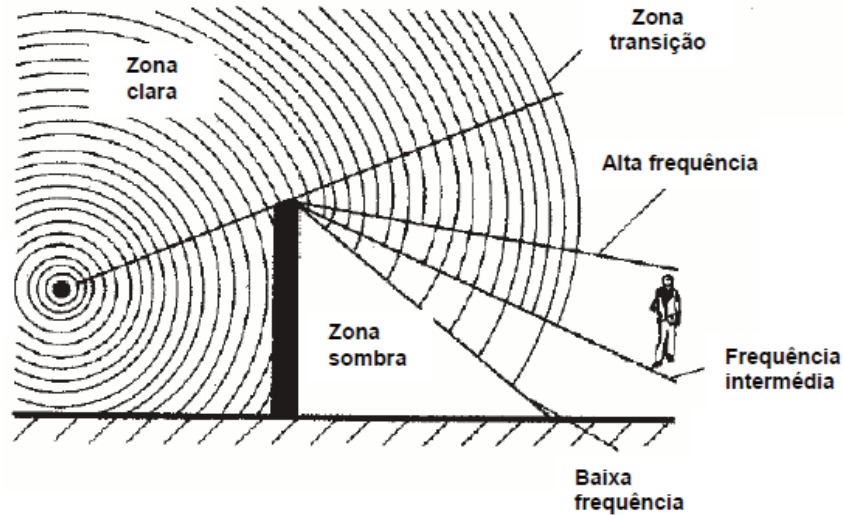


Fonte: Pazos (2015, p.1).

De acordo com Crocker (2007) *apud* Xavier (2009), devido à difração da onda sonora, esta poderá chegar ao receptor por meio de um percurso indireto sobre o obstáculo acústico, originando desta forma uma zona clara, e uma zona de sombra. No entanto, os raios sonoros difratados pelo topo da barreira atingirão uma

parcela pequena na zona de transição, próxima da zona de sombra ao interferir com a onda direta. A Figura 6 ilustra esta situação.

Figura 6 – Difração no topo da barreira cria a zona clara e de sombra.



Fonte: Cracker (2007) *apud* Xavier (2009, p.21).

No caso de barreiras longas, em que a difração do som dos flancos laterais da barreira não afeta o receptor, o som que o atinge é aquele que, a partir do emissor, na parte frontal da barreira, alcança o topo desta, sendo curvado para baixo por difração, a partir da chamada *zona de Fresnel*, localizada sobre o topo da barreira, gerando a *zona de sombra acústica* na parte posterior da barreira (BISTAFA, 2006).

A eficácia de uma barreira acústica é dada em função do número de Fresnel (N), expresso pela Equação 2:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

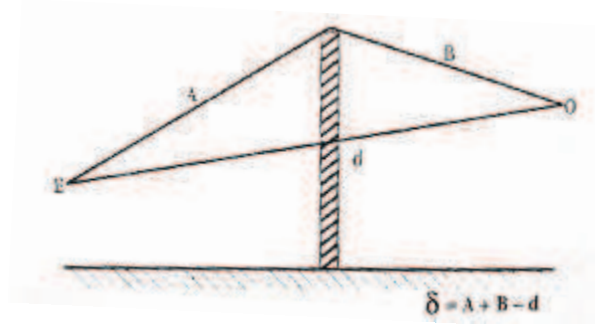
N = ao número de Fresnel, que é adimensional;

λ = comprimento de onda associado à frequência considerada, em metros;

δ = a soma dos caminhos difratados do som (A e B) e subtração do caminho direto de propagação do som (d), em metros;

A Figura 7 apresenta uma ilustração dos parâmetros de definição do número de Fresnel.

Figura 7 – Representação gráfica dos parâmetros para a definição do número de Fresnel

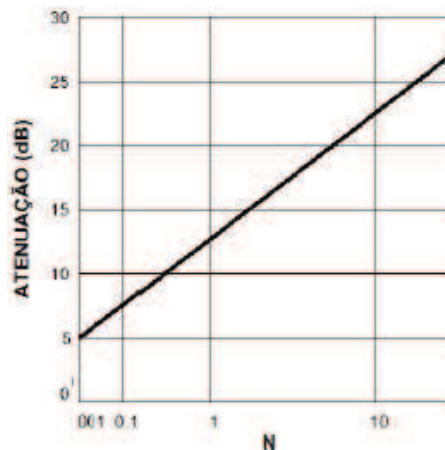


Fonte: Patrício (2010, p.46).

O símbolo δ relaciona a distância mais curta ($A + B$) com a distância direta (d) entre a fonte e o receptor. Os sinais $+$ e $-$ tem a função de indicar em que zona se encontra o receptor (conforme ilustrado na Figura 6), ou seja, N será positivo se estiver localizado na zona de sombra, e negativo se estiver na zona clara (BIES; HANSEN, 2003; CROCKER, 2007 *apud* XAVIER, 2009).

Alguns métodos empíricos são utilizados para a previsão de atenuação de uma barreira acústica, sendo o método de Maekawa, criado em 1968 um dos mais utilizados. Este método tem por base o número de Fresnel (N) relacionado com a fonte sonora, em função da frequência do som. A Figura 8 apresenta a curva de Maekawa, onde se pode obter a atenuação sonora relacionada ao número de Fresnel. Quanto maior o N , maior será a atenuação acústica da barreira, evidenciando assim o seu desempenho ao impedir a propagação direta dos raios sonoros entre a fonte, e o receptor (MORAIS, 2008).

Figura 8 – Curva de Maekawa de redução sonora em função do número de Fresnel



Fonte: Morais (2008, p.75).

A reta formada pela fonte/receptor, ao passar pela extremidade de uma barreira, terá o valor $N = 0$ para todas as frequências. Esta reta, ao ser interrompida pelo obstáculo acústico, apresentará o $N > 0$ e quando a reta não encontrar a barreira, tem-se $N < 0$ (MORAIS, 2008).

Portanto, é conveniente levar em consideração, além da atenuação sonora devido a difração proporcionada pela barreira acústica, também a atenuação proporcionada pela absorção da barreira, sendo esta estratégia mais eficiente no lado voltado para a face com maior absorção. Os materiais tipicamente utilizados na absorção sonora atuam de forma diferente nas diversas frequências, sendo que, os materiais porosos e fibrosos absorvem com maior eficiência os sons em altas frequências, e os painéis ressonantes, e ressonadores de Helmholtz combinam diferentes configurações para a absorção das baixas, e medias frequências. Desta forma, uma barreira acústica que utilize painéis ressonantes combinados com materiais fibrosos pode se configurar em uma solução para a redução dos níveis sonoros.

2.2.4 Ressonador de Helmholtz

O precursor na realização de experimentos com objetos esféricos, de tamanhos graduados, com um pescoço e um buraco para aproximar o ouvido, e assim escutar o resultado da experiência foi Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz (1821-1894). Com este ensaio, o pesquisador conseguiu estimar a energia para cada frequência por intermédio da intensidade acústica em diferentes ressoadores (LISOT et al., 2008a).

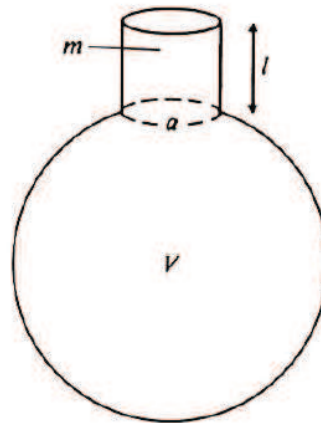
De uma forma simplificada, um ressonador de Helmholtz apresenta uma massa de ar em seu interior que funciona como uma mola enquanto a pressão do ar no gargalo atua como um pistão, que empurra este ar.

De acordo com Pazos (2015), os ressonadores de Helmholtz funcionam como mecanismos que se assemelham ao sistema massa-mola-amortecedor. São formados por cavidades abertas voltadas para o meio externo por pequenas aberturas. A mola (elemento rígido) é o ar contido dentro da cavidade do dispositivo, enquanto que a massa de ar nas pequenas aberturas que são excitadas pelo som que incide faz o papel de massa. A absorção, ou seja, o amortecedor se dá através do atrito do ar nas superfícies internas das aberturas, que pode ser ampliado com o

uso de materiais de absorção porosos ou fibrosos. A diminuição das aberturas também pode contribuir para a atenuação do som, formando micro poros.

As reflexões do som em áreas externas dependem da rigidez das superfícies e de sua conseqüente capacidade de absorção sonora. Segundo Lisot e Soares (2008b), um dos sistemas indicados para estes casos é o ressonador de Helmholtz, “que é um sistema absorvedor baseado na propriedade de dissipar energia em torno de uma frequência de ressonância a qual é função das características geométricas do sistema”. Ele consiste em uma cavidade de ar que se movimenta, e se conecta com uma determinada quantidade de ar presa em um volume. Este volume pode possuir diversas formas geométricas. Quando o ar interior do ressonador entrar em vibração com uma dada frequência, ele poderá dissipar a energia sonora, e transformá-la em onda mecânica sob a forma de atrito, funcionando desta forma como um absorvedor do som. A Figura 9 apresenta uma imagem de um ressonador de Helmholtz simples.

Figura 9 – Ressonador de Helmholtz



Fonte: López e Martín (2017).

Para estimar a frequência (f) em Hz de oscilação do ar no ressonador, utiliza-se a equação 3:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}}$$

Equação 3

Sendo que:

m é a massa de ar no gargalo (pescoço) em m^2 ;

V é o volume de ar do ressonador em m^3 ;

a é a área do gargalo em m^2 ;

l é o comprimento do gargalo em m ;

c é a velocidade do som no ar dado em m/s .

Conforme López e Martín (2017), a combinação de vários ressonadores se configura em uma boa solução para absorção acústica, sendo conhecida esta solução como ressonadores de múltiplas cavidades, compostos na maioria dos casos por painéis perfurados, também conhecidos como painéis ressonantes.

2.2.5 Painel Perfurado

Segundo Bolt (1947, *apud* PATRÍCIO; PATRAQUIM, 2008) a absorção sonora em painéis perfurados é amparada no conceito de um sistema absorvedor ressonante. O diâmetro dos furos, a quantidade (densidade) e a espessura do painel são fundamentais para o desempenho do sistema. Dando seguimento a este estudo, definiram que a absorção do som é diretamente dependente das características do painel em combinação com a caixa de ar.

Em geral, de acordo com Egan (2014), quanto menor o percentual de área aberta no painel, menor será a absorção de energia sonora nas altas frequências. Portanto, o número de furos por unidade de área, suas dimensões, e a área de superfície sólida, e as dimensões da área sólida entre as aberturas também afetam a redução na absorção.

Para Patricio e Patraquim (2008), os diâmetros dos furos com dimensões elevadas ou grandes larguras das ranhuras nos painéis perfurados acabam por ter pouca resistência acústica, sendo necessário complementar o sistema com materiais porosos, imediatamente após as aberturas dos furos, ou no interior destes com o objetivo de aumentar a absorção do som. Ainda de acordo com os autores, Davern realizou em 1977 uma investigação experimental com a utilização destes painéis e verificou que as porosidades, espessura e densidade são os parâmetros fundamentais para caracterizar a capacidade absorvente do sistema.

Normalmente, uma superfície com maior quantidade de furos apresenta um coeficiente de absorção maior. Deve-se ter em conta que quando da inserção de material poroso com propriedades absorventes no interior do sistema e a porcentagem de perfuração for superior a 20%, as características destes painéis já

não possuem mais influência sobre a absorção, que passa a ser caracterizada pelas propriedades absorventes do material poroso (LÓPEZ; MARTÍN, 2017).

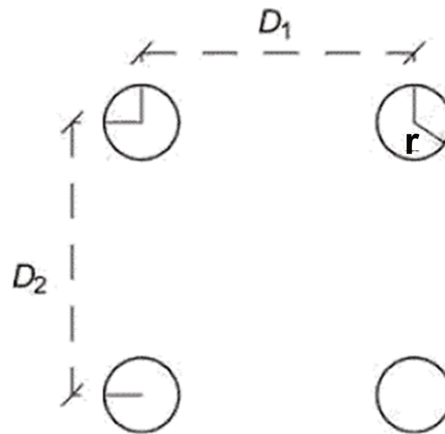
A equação para o cálculo do coeficiente de perfuração (P) do painel perfurado com furos cilíndricos é dada pela equação 4:

$$P = \frac{\pi r^2}{D_1 D_2}$$

Equação 4

Em que a área do círculo é dada por πr^2 em cm^2 e D_1 e D_2 são as distâncias de eixo a eixo dos furos em cm , conforme a Figura 10 abaixo:

Figura 10 – Parâmetros necessários para o cálculo do coeficiente de perfuração.



Fonte: Adaptado de López e Martín (2017).

Para painéis perfurados, o cálculo da frequência de ressonância é dado pela equação 5.

$$f_r = \frac{10c}{2\pi} \sqrt{\frac{P}{(e + 1,6r)d}}$$

Equação 5

Sendo: c é a velocidade de propagação do som no ar, dado em m/s ; P é a área perfurada, em %; e é a espessura da placa perfurada, em cm ; r é o raio dos furos, em cm e d é a espessura da câmara de ar, dado em cm .

Portanto, uma barreira acústica combinada com painéis ressonantes pode se configurar em uma boa alternativa para a redução sonora.

2.2.6 Barreiras Acústicas

Para mitigar o ruído propagado em área urbana, uma das estratégias utilizadas são as barreiras acústicas, que possuem a função de bloquear a transmissão sonora, protegendo desta forma as atividades localizadas em áreas sonoramente sensíveis. Os obstáculos acústicos são elementos de bloqueio compostos por painéis apoiados em sua superfície inferior. Esta estratégia acaba por obstruir a propagação direta, com a conseqüente difração do som, no meio de transmissão entre o emissor e o receptor (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Segundo Morais (2008, p.69),

Barreiras acústicas são dispositivos implantados entre a fonte e o receptor, que têm como principal função bloquear a propagação do som na direção dos receptores expostos a elevados níveis de ruído. Estes obstáculos devem ser utilizados em situações nas quais o ruído proveniente de uma fonte sonora causa incômodo à população próxima à fonte geradora, para reduzir o impacto sonoro sentido pela comunidade.

De acordo com Patrício (2010), as barreiras acústicas constituem a solução mais utilizada em intervenções no meio de propagação do som. Segundo Bistafa (2006), uma barreira acústica é qualquer obstáculo, ou estrutura que impede a visão da fonte pelo receptor. De uma maneira mais simplificada, uma barreira sonora é um painel espesso, ou não, instalado sobre um solo ou uma superfície inferior que tem por função separar a propagação direta entre um ou diversos emissores e um receptor, fazendo com que o som chegue até o receptor por meio da difração.

Uma barreira acústica também poderá ser qualquer obstáculo que impeça a propagação direta do som, podendo ser formadas por montes de terra, taludes, muros, prédios, ou a combinação de muro e montes de terra (LARANJA, 2004). A Figura 11 apresenta dois exemplos de configurações de uma barreira sonora.

Figura 11 – Modelos de barreira acústica feita por muro de tijolos (a) e combinação de muro e talude em (b)



Fonte: FWHA (2017).

Ainda de acordo com Laranja (2004), um obstáculo acústico não reduz totalmente o ruído, apenas atenua o nível total da pressão sonora.

A espessura e densidade superficial do material aplicado na composição de um obstáculo acústico poderá interferir no isolamento sonoro. Caso este material fosse aplicado em paredes, poderia ser verificado o isolamento desta parede pelo cálculo da perda por transmissão por intermédio da lei das massas. Assim sendo, esta lei preconiza que quanto maior for a densidade superficial da barreira, maior será a atenuação da energia sonora incidente. De acordo com a ISO 9613 - 2 (1996) a densidade superficial de um obstáculo sonoro deve ser igual ou maior que 10 Kg/m².

O projeto de uma barreira acústica apresenta diversos condicionantes como, por exemplo, a perda por inserção, altura e acabamento de topo, largura e acabamentos nos flancos laterais, e estática, e integração com o entorno.

2.2.6.1 Perda por Inserção (IL)

Ao se inserir uma barreira acústica o som será reduzido, esta redução se denomina de perda por inserção (IL), que é a redução da pressão sonora no caminho de propagação entre o emissor e o receptor, determinado pela diferença entre o nível de pressão sonora com, e sem a barreira. (PFRETZSCHNER, 1994; SCHOLLES, 1971 *apud* MORAIS, 2008). O IL poderá ser calculado pela Equação 6.

$$IL = L_{psb} - L_{pcb}$$

Equação 6

Sendo,

$L_{p_{sb}}$ é o nível de pressão sonora direto no receptor sem a barreira acústica;

$L_{p_{cb}}$ é o nível de pressão sonora direto no receptor com a inserção da barreira acústica.

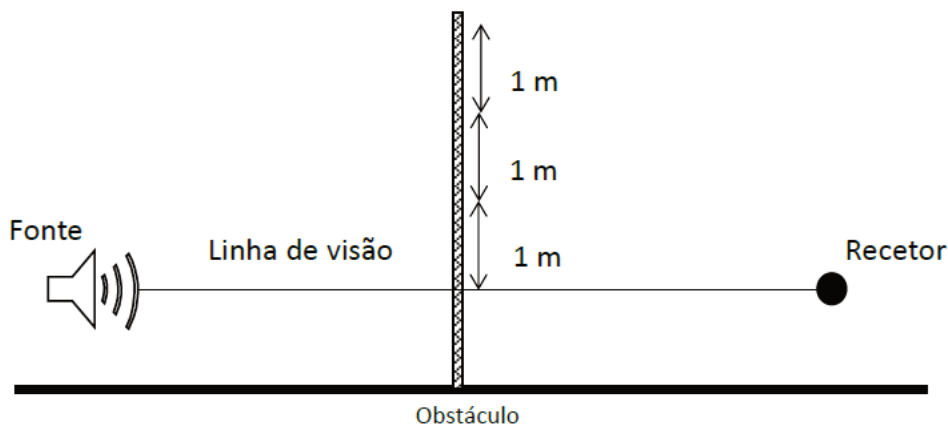
2.2.6.2 Altura e Acabamentos de Topo

Segundo Patrício (2010) para atenuar a passagem do som, as barreiras deverão ser colocadas próximas da fonte, ou do receptor, e suas dimensões para a altura deverão possuir de três a cinco vezes o comprimento da onda em questão. Além de funcionar como um obstáculo, as barreiras também poderão ter seu comportamento relacionado à absorção sonora das superfícies. Neste caso, as perdas ocasionadas pela inserção da absorção do som são consequências da viscosidade e do atrito do ar e dependem da rugosidade da superfície exposta.

De acordo com Hendriks et al. (2013), para um bom desempenho acústico, a altura da barreira sonora é fundamental. Apesar de não existir uma relação direta da altura com a atenuação, quanto maior a altura da barreira, maior será a distância que o som terá que percorrer entre a fonte, e o receptor, ou seja, entre os caminhos percorridos pelas ondas difratadas, e diretas.

Diversos fatores influenciam a altura de um obstáculo acústico, tais como: o custo associado, os requisitos necessários para a execução das fundações, estética, topografia e a atenuação sonora pretendida (KNAUER; PEDERSEN, 2006). Ainda de acordo com o mesmo autor, a relação entre a altura e a atenuação sonora ocasionada pela barreira poderá ser encontrada no método proposto pela FHWA (Federal Highway Administration), que admite o cálculo por perda de inserção (IL). Como regra geral, se considera que a cada metro adicionado na altura da barreira irá crescer 1,5 dB na atenuação. De acordo com o exemplo apresentado na Figura 12, os três metros acrescentados resultariam em uma redução de 4,5 dB.

Figura 12 – Dimensionamento da barreira acústica relativa à altura



Fonte: Gonçalves (2014, p.23).

Uma área sensível da barreira acústica é o topo da mesma, para o qual o fenômeno de difração atua na passagem do som para a zona protegida. Uma das técnicas propostas para a redução da difração é a adição de um elemento com característica de difusão no topo da barreira, como um meio de reduzir este fenômeno. O formato do acabamento superior poderá ser em Y ou T (HORVAT et al., 2016).

Para Knauer e Pedersen (2006), poucas pesquisas foram realizadas sobre os acabamentos de topo de uma barreira com o intuito de reduzir a sua altura e conseqüentemente melhorar a atenuação sonora da mesma. Barreira com menores alturas poderão apresentar resultados estéticos superiores e uma menor poluição visual. O acabamento de topo aumenta as difrações, e eleva a atenuação da barreira. Segundo o autor, estudos demonstram que barreiras que apresentam acabamento de topo em T fornecem perdas de inserção que podem ser comparáveis com barreiras mais altas, isso quando a diferença entre suas alturas for igual à largura do topo do perfil T. Se ambas barreiras possuírem a mesma altura, as perdas por inserção podem chegar a 2,5 dB a mais para a barreira com perfil de acabamento em T no topo.

As barreiras que apresentam acabamento no topo em forma de Y apresentam eficiência menor que as barreiras com perfil de topo em T. Outros tipos de acabamento na parte superior da barreira, como por exemplo cilíndricas, em forma

de pera, curvadas e pontiagudas, não apresentaram benefícios relevantes, exceto se utilizados materiais absorventes na sua concepção. Alguns exemplos de acabamentos superiores das barreiras são apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Possibilidades de acabamento de topo nas barreiras sonoras

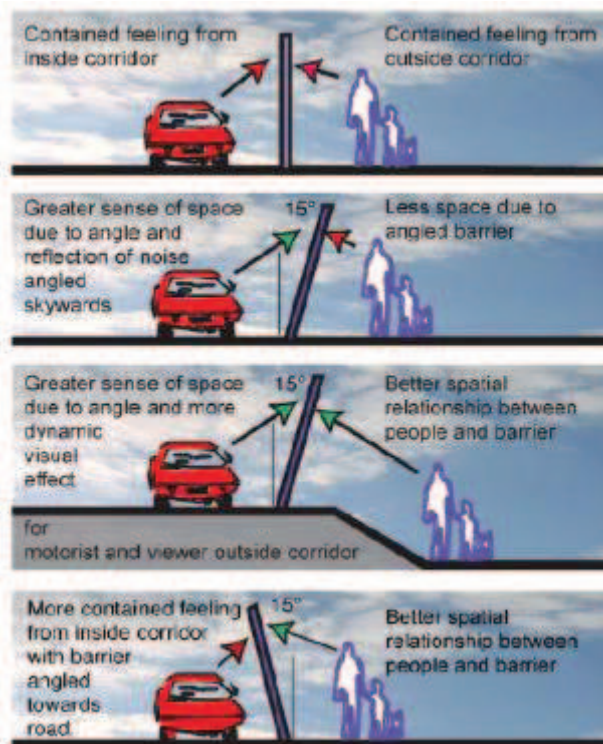


Fonte: Adaptado de Knauer ; Pedersen (2006).

Desta forma, a configuração do topo do obstáculo sonoro irá interferir consideravelmente na propagação do som, portanto, se torna uma opção relevante propor situações que contribuam para a atenuação do som na parte superior da barreira acústica. Ao se comparar barreiras convencionais com barreiras que possuem acabamento de topo, alguns estudos apontam para uma melhora significativa. Estes estudos comprovam que ao propor acabamentos superiores nas barreiras a atenuação sonora será superior quando comparadas com a estratégia de aumento da altura e espessura da barreira (CROMBIE et al., 1995; DAIGLE, 1999; ISHIZUKA; FUJIWARA, 2004; WATTS et al., 2003 *apud* GONÇALVES, 2014).

Outra estratégia para redução dos níveis de pressão sonora a ser utilizada é a inclinação da barreira. A Figura 14 apresenta alguns exemplos de inclinação da barreira, sendo que esta estratégia poderá restringir a técnica construtiva do obstáculo sonoro, que devido a sua inclinação terá esforços horizontais, o que poderá carregar as cargas recebidas pelas fundações, e por consequência aumentar o custo de execução. Dependendo para qual lado a inclinação da barreira estiver voltada, a sensação de redução do espaço, tanto para o lado do receptor quanto do emissor poderá causar certo incômodo. Relacionando a inclinação da barreira, e a redução de sua altura, Kotzen e English (2009), afirmam que a inclinação no topo da barreira em direção ao emissor se configura em uma solução simples para a redução da dimensão vertical do obstáculo acústico, pois permite que a borda na qual ocorre a difração do som fique mais próxima da fonte sonora.

Figura 14 – Exemplos de inclinação de barreiras



Fonte: Kotzen e English (2009, p. 85).

2.2.6.3 Largura e Acabamentos nos Flancos Laterais

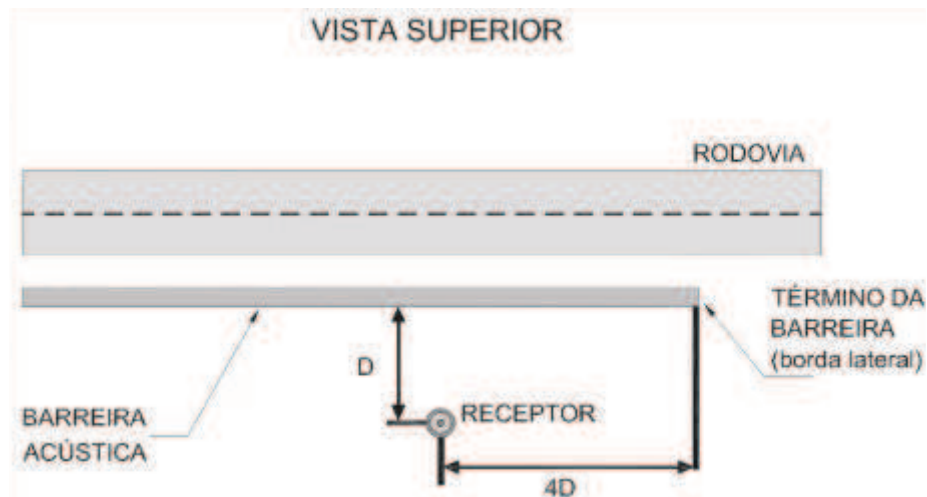
Para Hendriks et al. (2013), uma barreira deve ter largura suficiente para proteger os receptores. Caso a barreira não seja suficientemente larga, o segmento do emissor que está exposto contribuirá para uma parcela significativa da energia sonora recebida, e reduzirá drasticamente a eficiência da barreira.

De acordo com Kotzen e English (2009), os flancos laterais da barreira acústica também se configuram em áreas sensíveis, devido as ondas difratadas. Sendo assim, a redução proporcionada pela barreira não só dependerá de sua altura, e da localização da fonte sonora, e do receptor, mas também de seu comprimento.

Uma regra que pode ser aplicada, é a que o obstáculo acústico deve estender ao menos 4 vezes a distância perpendicular da barreira, e o receptor. Esta estratégia é chamada de 4D, sendo D a distância perpendicular da barreira ao receptor, assim ilustrada na Figura 15. À medida que a distância da barreira para o receptor

aumenta, o ruído causado pelo emissor reduz, assim como o ângulo do segmento da barreira, tornando a barreira menos efetiva (HENDRIKS et al., 2013).

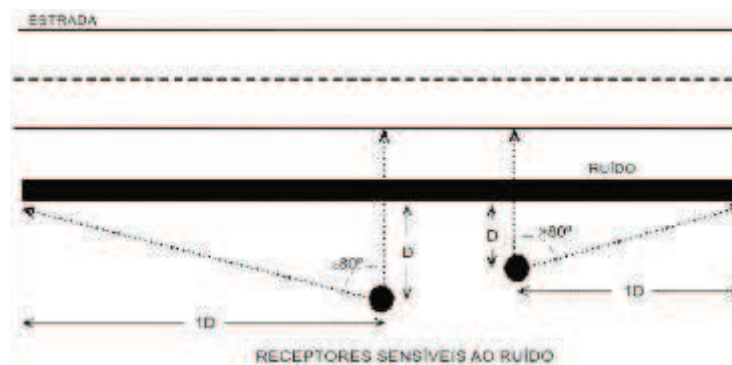
Figura 15 – Relação da distância D com a regra $4D$ para projeto de dimensionamento do comprimento da barreira



Fonte: Adaptado de Hendriks et al. (2013).

Outra forma de aplicar a regra do $4D$ é propor um ângulo mínimo de 80 graus do emissor para a extremidade da barreira, conforme demonstrado na Figura 16. O ângulo deve ser proposto a partir de uma linha perpendicular do receptor em direção ao emissor (KNAUER; PEDERSEN, 2006).

Figura 16 – Variação da regra $4D$, onde o ângulo de 80° projetado em relação os flancos laterais da barreira define seu comprimento

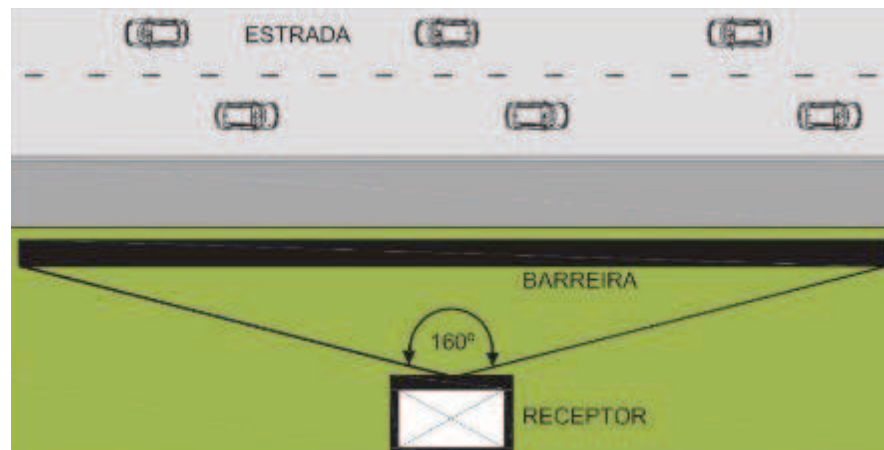


Fonte: Adaptado de Knauer e Pedersen (2006).

Kotzen e English (2009) afirmam que o som difratado nos flancos da barreira tende a ser menos relevante que o ruído difratado na borda superior. Isto devido ao benefício dado por qualquer absorção do solo que ainda ocorrerá no caminho de transmissão do raio direto. Se a barreira cobrir um ângulo de 160° compreendido

entre o emissor e receptor; uma estrada por exemplo; os raios difratados finais não serão significativos, conforme ilustrado na Figura 17.

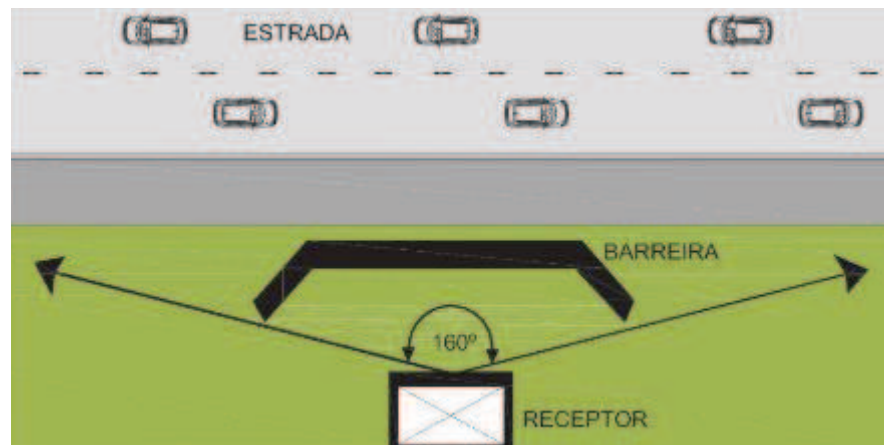
Figura 17 – Dimensionamento da extensão de uma barreira a partir do ângulo de 160°



Fonte: Adaptado de Kotzen; English (2009, p. 47).

Os mesmos autores complementam que o comprimento da barreira poderá ser reduzido, inclinando as suas bordas em direção ao emissor (Figura 18), caso haja espaço disponível.

Figura 18 – Exemplo de inclinação das bordas laterais da barreira



Fonte: Adaptado de Kotzen; English (2009, p. 47).

2.2.6.4 Estética e Integração com o Entorno

De acordo com Morais (2008), para uma barreira ser eficiente, ela deverá proteger a região sonoramente sensível da maior parte possível do som emitido por uma determinada fonte, considerando ainda seu aspecto visual, estrutural, segurança, e econômico.

Uma questão de relevada importância para a aplicação de obstáculos sonoros são as relacionadas com a sua forma. Para Házyová et al. (2014, p. 1) as barreiras acústicas não podem, “ser vistas apenas como muros que isolam o ruído, mas sim ser olhadas como molduras e/ou elementos das paisagens, devendo assim estar em perfeita harmonia com o meio envolvente”.

Outro fator importante na proposta de uma barreira acústica é a sua interação com seu entorno, levando em consideração que uma barreira sonora irá interferir na paisagem local, Kotzen e English (2009) afirmam que uma barreira deve reduzir o ruído aos níveis exigidos, e ser aceitável pelas leis municipais, mas para ser bem sucedido, o projeto deve receber a aprovação dos moradores locais. Para atender este objetivo, a barreira deve satisfazer estas condições, e deve ser projetada para estar inserida no entorno imediato. Quando isto não ocorre, e a barreira implantada não possui integração com a paisagem urbana, ela acaba por degradar o local, reduzindo a qualidade da paisagem urbana, e despertando a animosidade da comunidade circundante.

Dentro desta mesma perspectiva, Házyová et al. (2014) afirmam que é necessário ter alguns cuidados estéticos no projeto destas barreiras, que são normalmente dimensionadas inicialmente para reduzir os níveis de propagação sonora. Os cuidados no desenho deste obstáculo acústico, por exemplo, devem considerar a forma, dimensão, aparência, e sombreamento que este elemento provoca.

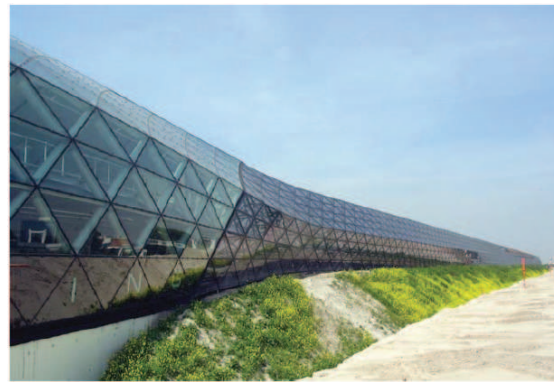
Uma barreira acústica poderá ser construída de diversos materiais, tais como: concreto, alvenaria, metal, e materiais translúcidos (HALIM et al., 2015).

A Figura 12 apresenta quatro exemplos de barreiras acústicas e sua interação com o entorno imediato. Nesses exemplos são utilizados materiais, como estrutura metálica, e fechamento translúcido (Figura 19a), estrutura metálica, e fechamento transparente possibilitando integração visual com um edifício (Figura 19b), terreno em declive formando um talude com vegetação rasteira, e de médio porte (Figura 19c) e pedras em gaiolas metálicas (Figura 19d).

Figura 19 – Exemplos de barreiras acústicas: estrutura metálica e fechamento translúcido (a), fechamento transparente (b), talude com vegetação (c) e pedras (d)



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Kotzen e English (2009).

Uma situação que deverá ser evitada ao implantar uma barreira acústica é a proximidade da barreira dos andares mais baixos de uma edificação, pois poderá passar a sensação de confinamento, e irá bloquear a vistas dos moradores próximos, devido a curta distância entre o ambiente interno (receptor), e a barreira (PETROVICI et al., 2016).

Para Bistafa (2006), o vento no sentido fonte-receptor poderá reduzir a eficiência de barreiras acústicas, principalmente se esta estiver situada a meia distância. Gradientes de velocidade do vento, e de temperatura são variações de velocidade do vento, e temperatura conforme a altitude. Em contrapartida, estes gradientes provocam gradientes de velocidade do som. A velocidade do som é proporcional à temperatura, assim, em regiões onde a temperatura é elevada, a velocidade do som também será. Os gradientes de temperatura originam gradientes de som, com características idênticas.

As características atmosféricas para pequenas distâncias de até 50 m não são relevantes. Pode-se citar uma pequena influência do vento, e ignorar o efeito das alterações na umidade relativa do ar (BRÜEL & KJAER, 2001).

Quando a velocidade do som no ar se mantém constante, e não ocorrem variações de temperatura, ventos ou outros fatores, ou ainda, para distâncias menores que 100m entre o emissor, e receptor em que não ocorram grandes variações climáticas, os efeitos atmosféricos não são significativos (L'ESPÉRANCE, et al., 1992; WEST, et al., 1992 *apud* LARANJA, 2004).

3 MÉTODO

Para a confecção deste trabalho, foi realizada inicialmente uma pesquisa exploratória que segundo Gil (2002) tem como objetivo proporcionar maior conhecimento sobre o tema, tornando-o mais claro, ou ainda a auxiliar na formação de hipóteses.

Para a abordagem metodológica, fundamentada em uma situação real, o estudo de caso envolveu ainda procedimentos de levantamento de campo, ensaios experimentais em campo, e em laboratório. Desta forma, foi possível a análise das variáveis sonoras, e dos espaços físicos para o conhecimento do problema.

O método descrito neste capítulo foi desenvolvido de acordo com as seguintes etapas:

- definição do objeto de estudo: seleção das EMEIs vizinhos às edificações residenciais, com disponibilidade para a realização das medições de ruído;
- caracterização das fontes sonoras: medições de ruído durante as atividades nas áreas externas das escolas;
- determinação do coeficiente de absorção sonora do painel proposto para a barreira acústica: ensaios em laboratório, em câmara reverberante;
- simulação computacional: modelagem, e estimativa dos níveis de pressão sonora com a proposta de barreira acústica.

3.1 OBJETOS DE ESTUDO

Os objetos de estudo desta dissertação são duas escolas integrantes da Rede Municipal de Ensino do Município de Porto Alegre, no Estado do Rio Grande do Sul. Ambas as escolas fazem parte da rede de Escolas Municipais de Educação Infantil – EMEI – estão localizadas nas zonas sul e leste da cidade, com edificações residenciais em lotes vizinhos e atendem, aproximadamente, 170 crianças em turno integral. Para facilitar a identificação das escolas, ambas serão apresentadas com siglas, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Siglas adotadas para as escolas

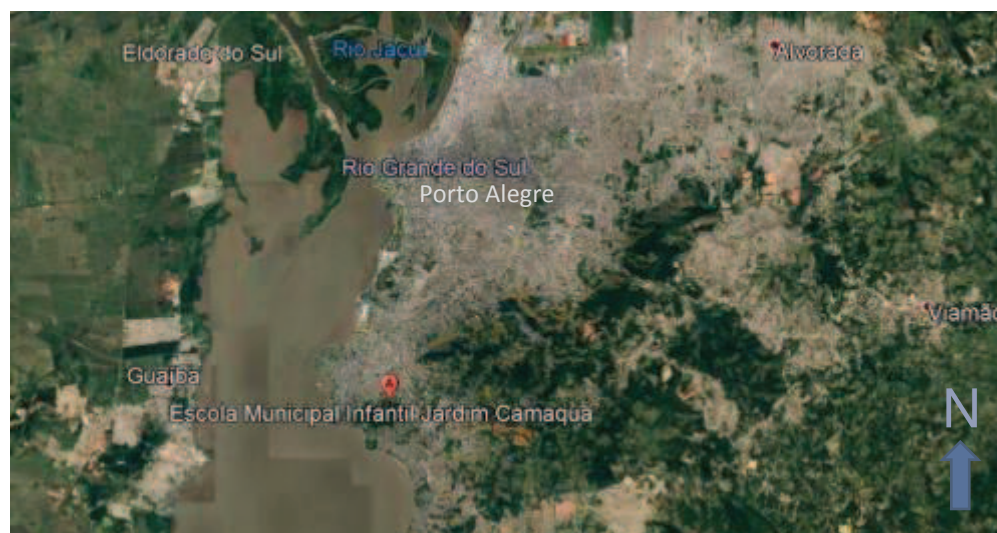
Nome da escola	Sigla adotada
EMEI Jardim Camaquã	JC
EMEI Unidos da Paineira	UP

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.1 EMEI Jardim Camaquã

A EMEI Jardim Camaquã está localizada na Zona Sul de Porto Alegre, conforme mostra a Figura 20. A escola está implantada em área predominantemente residencial de baixa renda.

Figura 20 - Vista aérea da localização da escola



Fonte: Google Earth (2018).

A implantação da escola foi realizada em área comunitária pertencente ao Departamento de Habitação da Prefeitura de Porto Alegre (DEM HAB), na rua Jardim das Bromélias, número 185 no bairro Camaquã. A Figura 21 apresenta a vista do acesso da escola.

Figura 21 – Vista do acesso da EMEI Jardim Camaquã



Fonte: Registrada pelo autor.

A residência vizinha está implantada ao lado da edificação escolar (Figura 22), em uma rua sem saída sendo, portanto, a Escola a principal fonte geradora de ruídos.

Figura 22 - Vista aérea com a localização da escola e da residência vizinha



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

A fachada da residência é composta de parede simples de alvenaria, executada com tijolos de 6 furos, rebocados externa, e internamente com espessura total de 15 cm, e pintura somente na face interna, conforme a Figura 23. Na mesma figura, as janelas da sala de estar estão destacadas.

Figura 23 – Foto da fachada da residência vizinha à EMEI Jardim Camaquã e identificação das janelas da sala de estar



Fonte: Registrada pelo autor.

A fachada possui duas aberturas com caixilhos de ferro de 0,96 x 0,97m com peitoril de 1,02m, conforme ilustrado nas Figuras 24 e 25.

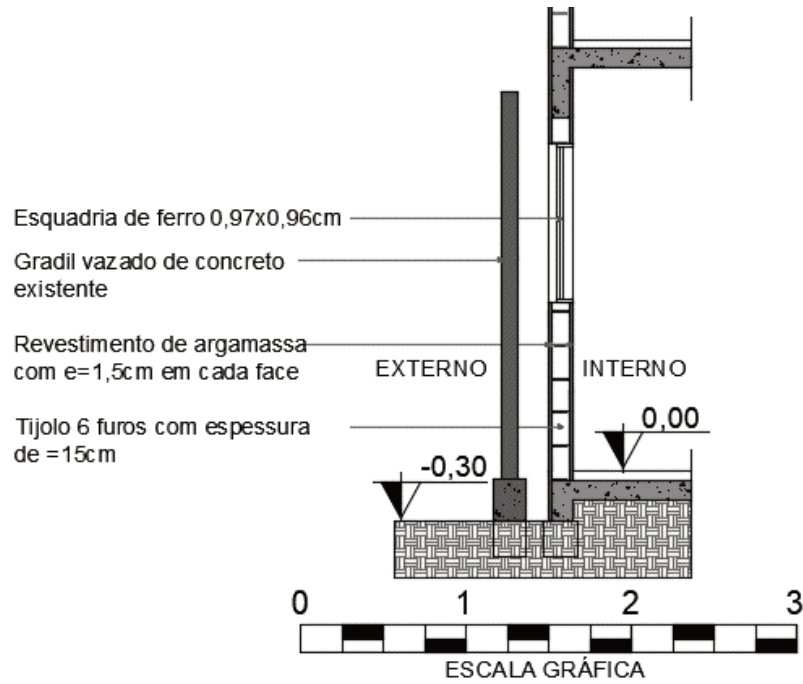
As atividades externas com maior emissão de ruídos são realizadas no playground, que está localizado entre o bloco administrativo da escola, e a habitação unifamiliar vizinha.

Figura 24 – Foto com a localização do playground e a residência vizinha



Fonte: Registrada pelo autor.

Figura 25 – Corte esquemático da fachada da residência que está voltada para o playground da escola



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.2 EMEI Unidos da Paineira

A escola Unidos da Paineira está localizada na rua Tobias Barreto, número 170 no bairro Partenon, na zona Leste de Porto Alegre, conforme Figura 26.

Figura 26 – Planta de situação com a localização da escola na malha urbana



Fonte: Google Earth (2018).

Este endereço atende a escola desde 2010, tendo em vista que neste ano o prédio original da escola foi interditado por problemas estruturais.

A Figura 27 mostra uma vista do acesso da escola, na qual é possível identificar que originalmente o uso do edifício era residencial, preservando ainda características arquitetônicas da cobertura, e portão de acesso.

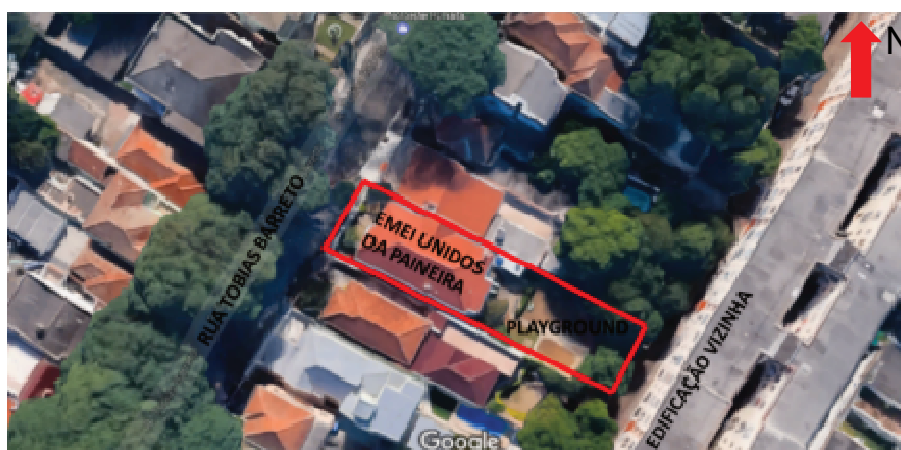
Figura 27 – Vista do acesso da EMEI Unidos da Paineira



Fonte: Registrada pelo autor.

A escola está localizada em uma rua com uso residencial, tendo como vizinho um edifício de habitação multifamiliar de quatro pavimentos, situado ao fundo do lote, como demonstrado na Figura 28.

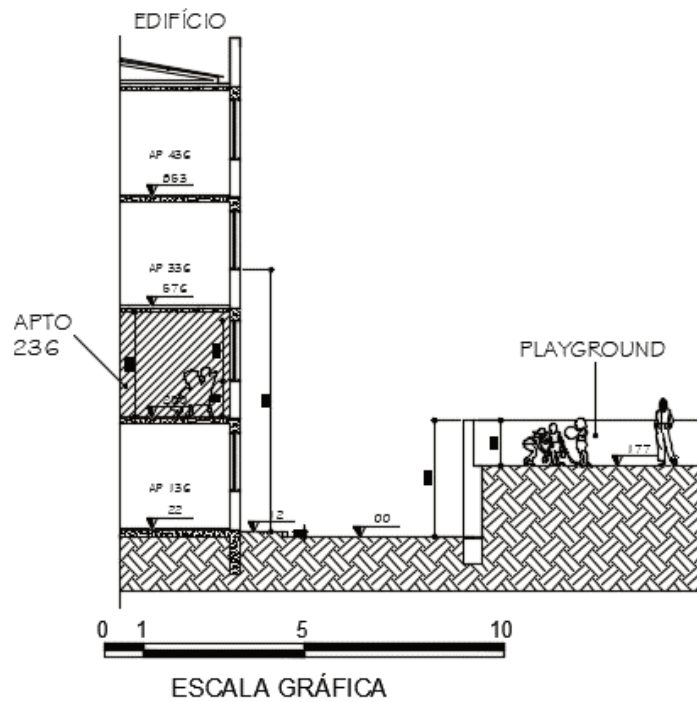
Figura 28 – Vista aérea com a identificação do prédio vizinho



Fonte: Adaptado de Google Earth, 2017.

O edifício residencial está implantado em uma cota inferior a escola, com diferença de 1,77 metros, conforme demonstra a Figura 29. A Figura 30 ilustra a vista do playground em direção ao prédio vizinho.

Figura 29 – Corte esquemático da relação entre o edifício vizinho e o playground da EMEI Unidos da Paineira



Fonte: Elaborada pelo Autor.

Figura 30 – Foto do playground com o prédio vizinho ao fundo

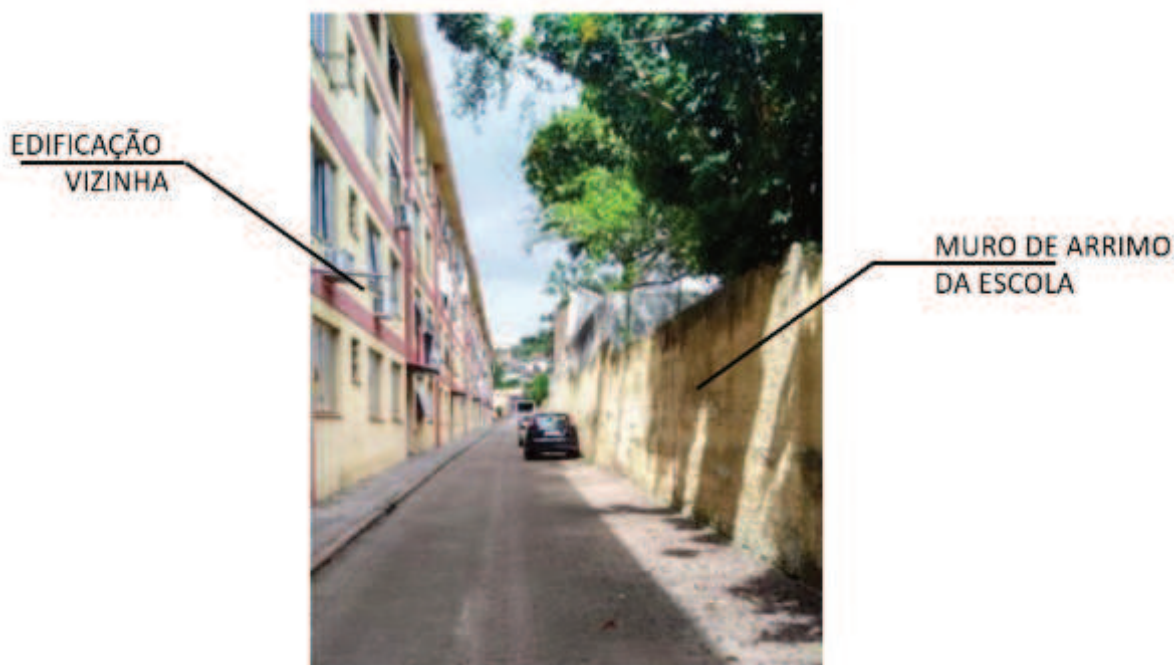


Fonte: Secretaria Municipal de Educação de Porto Alegre (2017).

O sistema construtivo do edifício foi concebido em concreto armado moldado no local para o sistema estrutural, para os sistemas de vedações verticais internos, e externo foi utilizada a alvenaria de tijolos furados com 15 e 25cm de espessura,

respectivamente. As aberturas são em madeira, com 1,93m de largura por 1,50m de altura, e as venezianas externa em alumínio natural, conforme Figura 31.

Figura 31 – Vista externa da fachada do edifício vizinho à EMEI Unidos da Paineira



Fonte: Registrada pelo autor.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES SONORAS

Para este trabalho, foram realizadas medições de ruído nas áreas externas das escolas e em ambientes internos de edificações residenciais vizinhas.

Para embasamento do levantamento dos dados e análise, foram utilizadas as NBR 10151 (ABNT, 2003) e 10152 (ABNT, 2017) nas medições externas, e internas.

A coleta de dados foi realizada com um analisador sonoro Bruel e Kjaer, modelo B&K 2270 (Figura 32), posicionado dentro dos ambientes das habitações, e externamente no playground das escolas. O equipamento foi fixado sobre um tripé, distante a 1,20m do solo, conforme recomendado pela NBR 10151 (ABNT, 2003).

Ao microfone foi acoplada uma espuma esférica de proteção contra os efeitos dos ventos, seguindo a recomendação da referida norma. Sendo as manutenções, e calibrações dos respectivos instrumentos realizadas conforme plano de manutenção do itt Performance.

Figura 32 – Analisador Sonoro utilizado para as medições acústicas



Fonte: Registrada pelo autor.

Para atendimento das normas, e análise dos dados foi selecionado o parâmetro L_{Aeq} , ponderado em A nas faixas de frequência de oitavas (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 KHz, 2 KHz, 4 KHz e 8 KHz), como forma de expressão dos resultados, sendo assim, os valores em termos do nível de pressão sonora equivalente contínua.

Para ambas as escolas, as medições foram realizadas no turno da manhã, período em que o playground é utilizado pelas crianças das turmas de Jardim A, e B.

Os pontos de medição estão identificados pela sigla EP, em que E identifica a escola objeto da medição, e P o ponto onde foi posicionado o medidor sonoro (receptor) seguido de numeral, distinguindo as posições. A escola JC possui a identificação E1 enquanto a UP é identificada pela sigla E2.

3.2.1 Medições Internas

As medições internas na sala de estar da residência e do edifício vizinho ocorreram de maneira similar, conforme critérios elencados pela NBR 10151 (ABNT, 2003), que consiste em:

- 1- Coleta de dados em três pontos distintos, distantes no mínimo 0,5m entre eles, e efetuados nas condições de utilização normal do ambiente, ou seja, em duas situações: com a janela aberta, ou fechada.
- 2- Afastamento de 1,00m do analisador sonoro de paredes internas, forros, pisos e móveis.

A NBR 10152 (ABNT, 2017) também aborda as medições internas, mas não especifica quanto a situação da janela se deve ser aberta, ou fechada, mas preconiza o mínimo de três posições, distantes 0,7 m entre os pontos, e o limite para ambientes de 30 m². Caso o ambiente possua área superior, é recomendado que seja aumentado um ponto para cada 30 m² de área adicional. O critério adotado quanto às condições de utilização do ambiente foi a de realizar as medições em duas situações: dois pontos com a janela aberta, e um com a janela fechada, totalizando três pontos.

As medições ocorreram em um intervalo de três minutos para cada ponto. A NBR 10152 (ABNT, 2017), estabelece como valores de referência para ambientes de sala de estar em uma residência o valor de 40 dB, sendo considerada uma margem de 5 dB para mais, ou menos. Nas áreas internas, a referida norma determina níveis máximos em L_{Aeq} em dB, e a composição espectral do som através das curvas NC.

Após a coleta dos dados, foi realizada a média aritmética do resultado medido em cada ponto no intervalo das oito faixas de frequência por banda de oitava.

3.2.2 Medições Externas

A NBR 10151 (ABNT, 2003) determina que o nível de critério de avaliação (NCA) para ambientes externos seja de, no máximo, 50 dB no período diurno, em área estritamente residencial urbana, ou de hospitais, ou de escolas, conforme apresentado anteriormente na Tabela 2.

Para o playground, foram realizadas medições em duas posições com afastamentos de 1,2 m do piso e 2,0 m de superfícies refletoras, como paredes, muros, e limite do lote. A NBR 10151 (ABNT, 2003) não estabelece a quantidade mínima de pontos de medição, apenas orienta sobre os requisitos para ensaio de campo, conforme elencados acima.

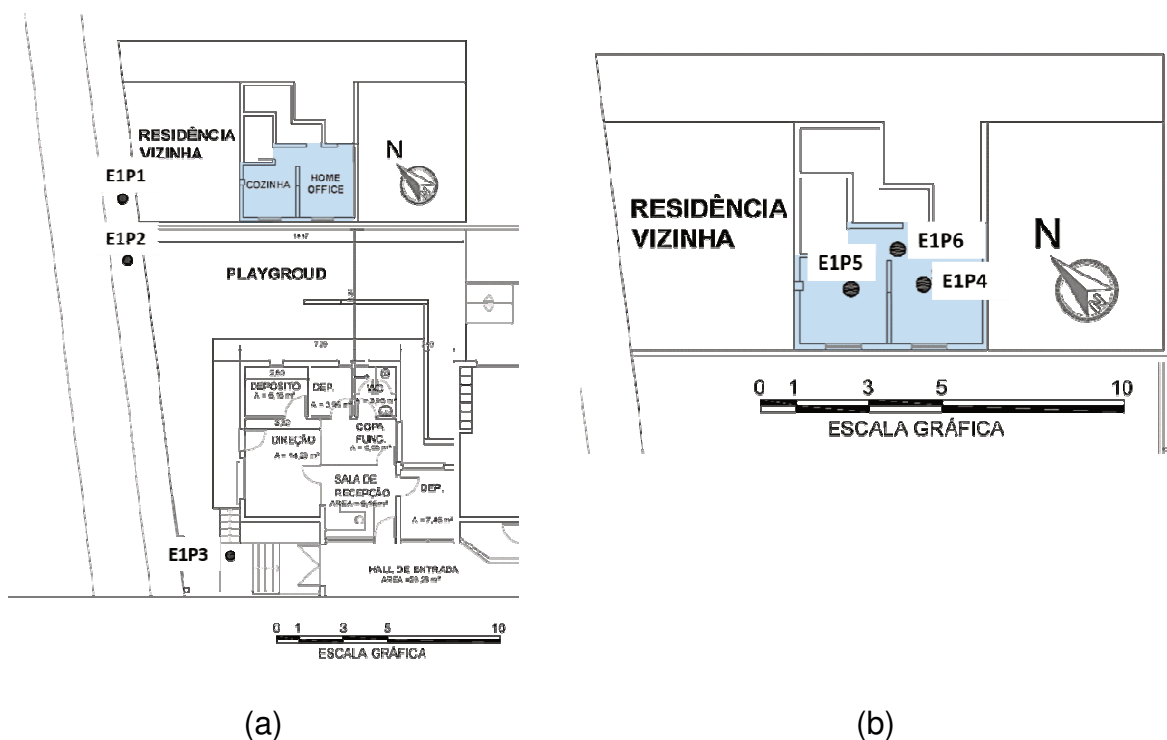
Para fins de classificação do som gerado pela atividade das crianças, foram realizadas medições dos níveis de pressão sonora ponderados em A em bandas de oitava entre 63 a 8.000 Hz, durante 20 segundos de captação dos níveis sonoros gerados na atividade contínua da recreação. Ou seja, foram desprezados dados nos quais as atividades sonoras sofreram interrupções durante o tempo estipulado para a medição.

3.2.3 Escola Jardim Camaquã

As medições na escola JC ocorreram no turno da manhã nos horários compreendidos entre às 10h e 11h, com as turmas de jardim B, que possui crianças com idades de 5 a 6 anos. As medições ocorreram nos dias 4, e 5 de novembro de 2016, sendo realizada medições internas no primeiro dia, e externa no segundo.

Os pontos de medição interna, e externa estão identificados conforme apresentado na Figura 33.

Figura 33 – Localização dos pontos de medição (a) na área de playground na EMEI Jardim Camaquã e (b) no ambiente interno da residência vizinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

As medições internas nas residências vizinhas aconteceram no turno matutino, no dia 04 de novembro de 2016. A posição dos microfones, bem como o afastamento seguiram as orientações da NBR 10151. A Tabela 5 apresenta os dados coletados.

A Tabela 5 identifica os pontos, e a situação da janela quanto a sua abertura, conforme os critérios apresentados pela NBR 10151 (ABNT, 2003).

Tabela 5 – Identificação dos pontos internos e situação das janelas

Identificação do ponto	Janela
E1P4	aberta
E1P5	fechada
E1P6	aberta

Fonte: Elaborada pelo autor.

O ponto identificado como E1P5 foi posicionado na cozinha, tendo em vista que a sala de estar possui dimensões reduzidas, e estes ambientes estão conectados diretamente, sem paredes que os separam. A Figura 34 representa as fotos do local de instalação do aparelho de medição de pressão sonora.

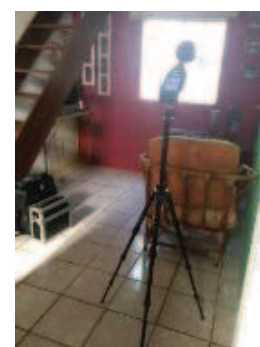
Figura 34 – Fotos da posição do medidor sonoro na sala de estar da residência



E1P4



E1P5



E1P6

Fonte: Registrada pelo autor.

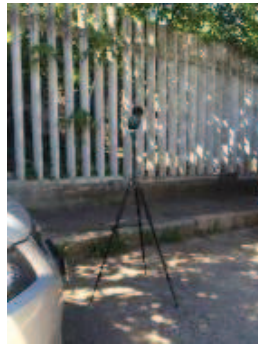
As medições externas foram realizadas conforme procedimentos apresentados na Seção 3.2.2. Os equipamentos foram posicionados fora da área de playground, conforme instruído pela NBR 10151, desta maneira não interferiu nas atividades das crianças.

Para as medições externas, a identificação dos locais seguiu as seguintes nomenclaturas: E1P2, E1P5 e E1P3. Sendo que as duas primeiras foram medidas fora do terreno da escola, e a última internamente ao lote, mas fora da área de playground. A Figura 35 apresenta as fotos dos aparelhos posicionados externamente.

Figura 35 – Fotos dos aparelhos de medição acústica para as áreas externas



E1P1



E1P2



E1P3

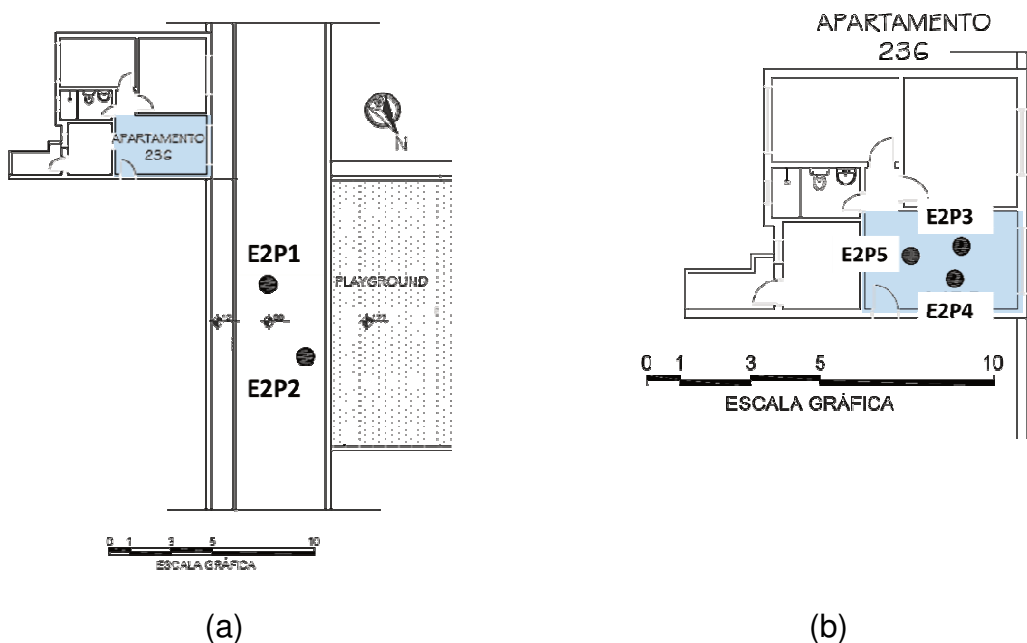
Fonte: Registrada pelo autor.

3.2.4 Escola Unidos da Paineira

Os ensaios foram realizados no dia 26 de outubro de 2017 pela manhã. As medições ocorreram inicialmente no apartamento vizinho e após na área externa do condomínio, próximo ao Playground. Também não houve contato visual dos equipamentos com as crianças, evitando que as mesmas perdessem a naturalidade no uso do pátio.

Os pontos internos, e externos utilizados para o ensaio estão identificados na planta de localização, conforme Figura 36.

Figura 36 – Localização dos pontos de medição (a) na área de playground na EMEI Unidos da Paineira e (b) na sala de estar do apartamento da edificação vizinha (b)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A localização do imóvel no qual foram realizadas as medições está identificada na Figura 37. O apartamento onde foi realizado as medições foi o número 236, localizado no segundo andar do prédio. O imóvel possui 47,00 m² de área total, a sala de estar; local das medições; possui área de 13,66 m².

Figura 37 – Foto com a localização do imóvel onde foram realizadas as medições internas



Fonte: Registrada pelo autor.

Os pontos internos estão identificados na Tabela 6, seguindo os critérios de dois pontos com a janela aberta, e um com a janela fechada.

Tabela 6 – Identificação dos pontos internos no apartamento 236

Identificação do ponto	Janela
E2P3	aberta
E2P4	aberta
E2P5	fechada

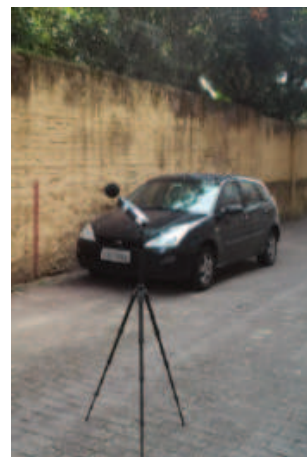
Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram utilizadas duas posições externas para medição, conforme apresentado anteriormente na Figura 35 e identificadas como E2P2 e E2P1. Não houve registro de atividades fora do comum no que diz respeito ao ruído. A Figura 38 apresenta as fotos do posicionamento do equipamento durante os ensaios de campo na Escola Unidos da Paineira.

Figura 38 – Fotos dos aparelhos de medição na área externa do condomínio



E2P2



E2P1

Fonte: Registrada pelo autor.

3.3 PROTÓTIPO DA BARREIRA ACÚSTICA

A solução adotada para este trabalho segue os princípios de uma barreira acústica com tratamento fonoabsorvente de uma das superfícies, na forma de painéis perfurados.

Segundo Patricio e Patraquim (2008), para este tipo de solução, a montagem dos painéis deve ser realizada afastados das paredes de suporte, criando desta forma uma caixa de ar na parte inferior, podendo ser preenchida com material fonoabsorvente.

Sendo assim, o processo de absorção sonora tem como princípio a promoção de uma vibração natural, da mesma forma que um ressonador de Helmholtz.

3.3.1 Painéis para as Barreiras Acústicas

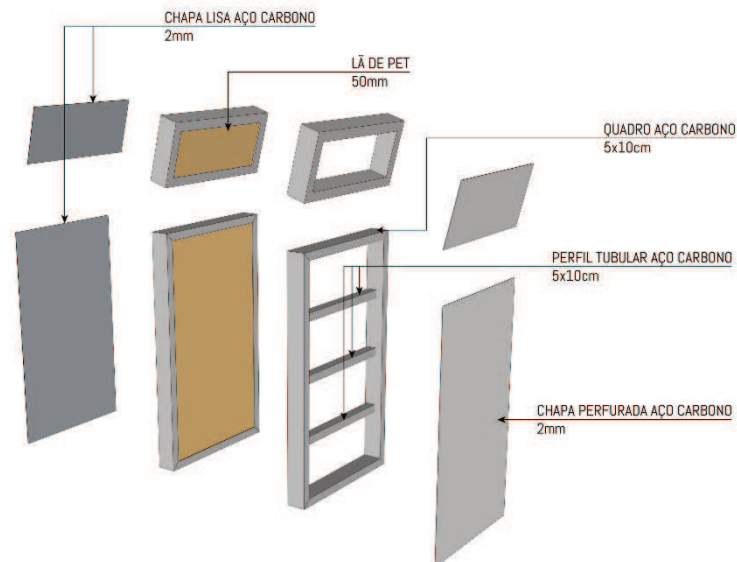
Para o projeto, ambas as escolas buscaram atender aos condicionantes levantados na pesquisa bibliográfica, principalmente aos requisitos de altura, comprimento, inclinação do topo da barreira, e estética.

O projeto arquitetônico de inserção da barreira acústica buscou incorporar o design da mesma na proposta do projeto de arquitetura do playground. Com isso, a barreira não será vista como um elemento estranho ao espaço.

Os painéis acústicos que configuram a barreira são compostos de perfis metálicos, e internamente recebem material fonoabsorvente. Os fechamentos

externos são em chapas metálicas, sendo perfuradas na face voltada para o emissor e lisa para a voltada para o receptor, conforme apresentado na Figura 39. As chapas apresentam furos de 6mm e espaçamento de 1cm entre eixos, em ambas as direções, vertical e horizontal.

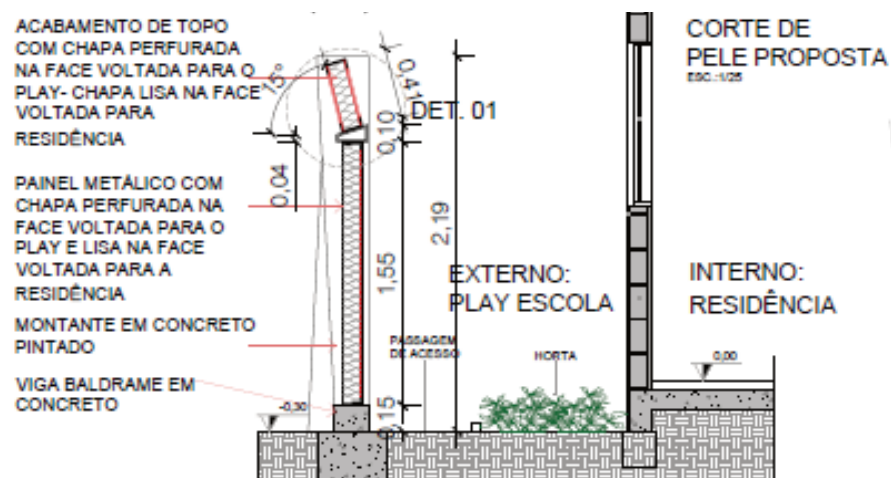
Figura 39 - Imagem explodida do painel acústico que configuram a barreira.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o objetivo de padronizar o projeto, a altura da barreira com o acabamento de topo é de 2,19m para ambas as escolas. A Figura 40 apresenta o detalhe construtivo da barreira, e as suas especificações.

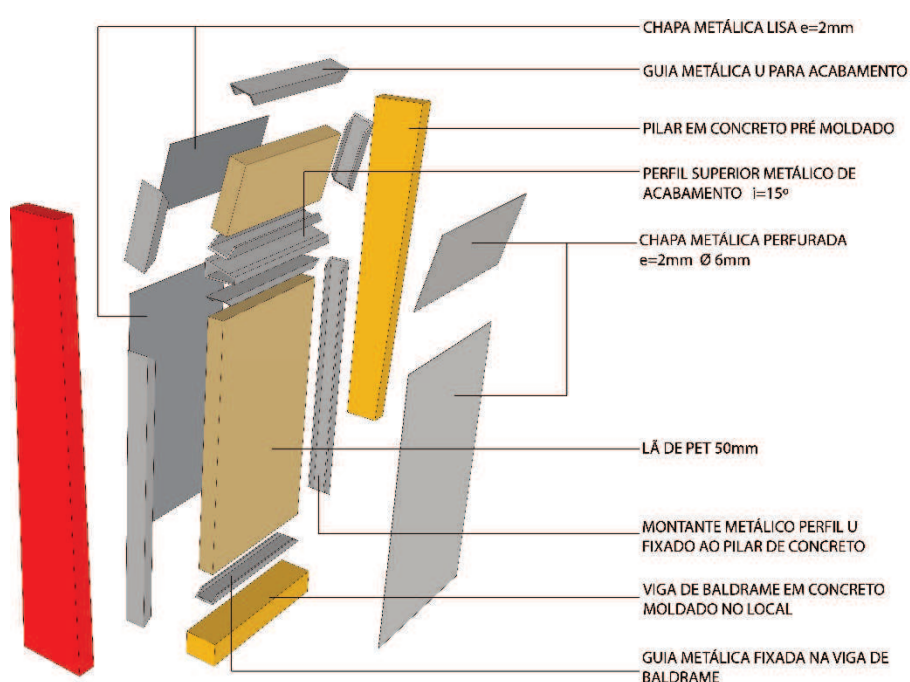
Figura 40 - Detalhe arquitetônico da barreira acústica e especificações



Fonte: Elaborada pelo autor.

A barreira sonora é composta pela instalação dos painéis modulados, com espaçamento de 1,00 m entre eixos, que são fixados sobre uma viga de baldrame e pilares de concreto. Guias e montantes metálicos com perfil “u” são parafusados nos pilares, e baldrame, para então receber os painéis acústicos que se encaixam nestes perfis. Após são instalados os acabamentos de topo, com inclinação de 15° voltados para o emissor. A Figura 41 apresenta a composição do obstáculo sonoro em uma imagem explodida.

Figura 41- Imagem explodida da barreira acústica

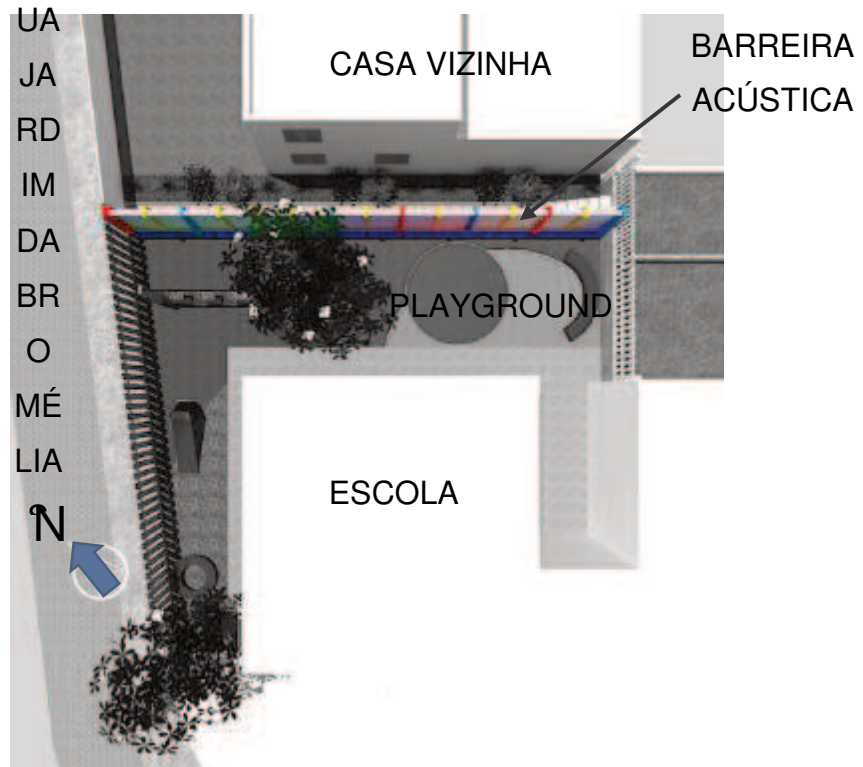


Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1.1 Escola Jardim Camaquã

Para a escola JC, a barreira foi implantada a 1,50 m da residência receptora dos ruídos. No espaço entre a barreira, e a casa foi implantada uma horta, com acesso controlado pelos professores. Os pisos especificados são do tipo emborrachados, e impermeáveis, com espessura de 40 mm, e apresentam as mesmas cores dos pilares que estruturam aos painéis modulados da barreira sonora, conforme a Figura 41. Os brinquedos do playground também foram reposicionados, e a inserção de bancos curvos, e coloridos foram propostos no projeto arquitetônico.

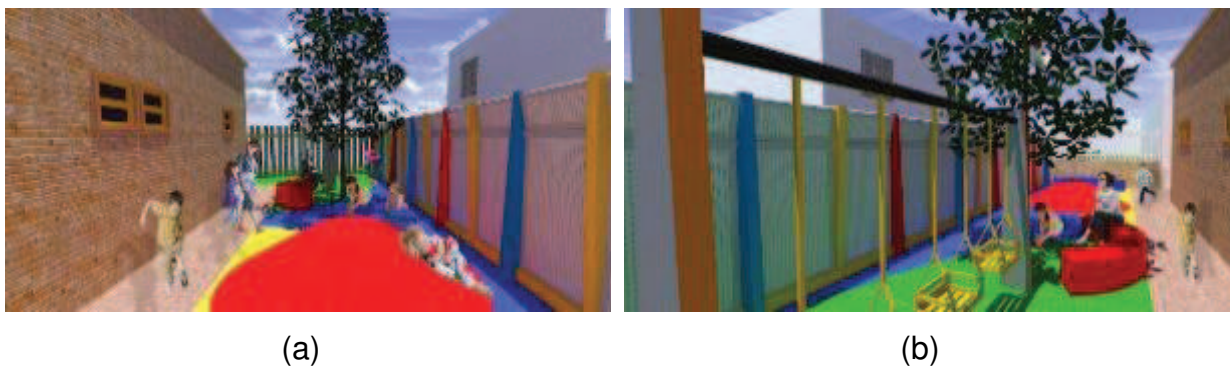
Figura 42 – Implantação do projeto arquitetônico do playground da EMEI JC



Fonte: Autor.

A Figura 43 apresenta perspectivas ilustrativas do projeto das barreiras acústicas, e sua relação com o playground, sendo as seguintes: vista do pátio interno em relação a rua de acesso da escola (a), vista da rua de acesso em direção ao pátio interno (b) e imagem do acesso à escola em direção ao playground (c).

Figura 43 - Perspectivas ilustrativas do projeto da barreira acústica e do playground da escola JC.



(a)

(b)



(c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1.2 Escola Unidos da Paineira

Os critérios de projeto foram os mesmos utilizados na escola JC, no requisito design. Optou-se por manter o muro de arrimo existente no limite da escola com o prédio vizinho, e ali desenvolver uma horta. A barreira foi proposta a 1,50 m deste limite, e foi disposta sobre todo o comprimento deste perímetro.

A Figura 44 apresenta a implantação do projeto arquitetônico da barreira acústica, e do playground.

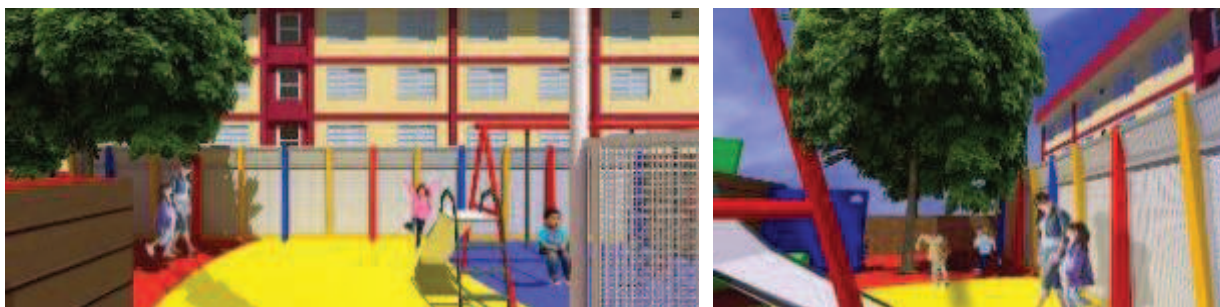
Figura 44 – Implantação do projeto da barreira acústica do playground da escola UP



Fonte: Elaborada pelo autor.

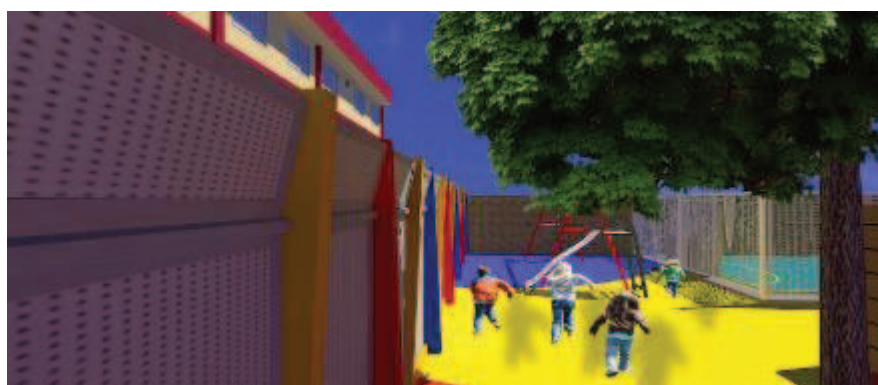
A Figura 45 apresenta perspectivas de pontos diferentes do espaço arquitetônico. Sendo: vista do prédio escolar em direção ao alinhamento de fundos (a), vista do fundo do playground em direção ao alinhamento esquerdo (b) e vista do fundo do playground em direção ao alinhamento direito.

Figura 45 - Perspectivas ilustrativas do playground e barreira acústica da escola UP



(a)

(b)



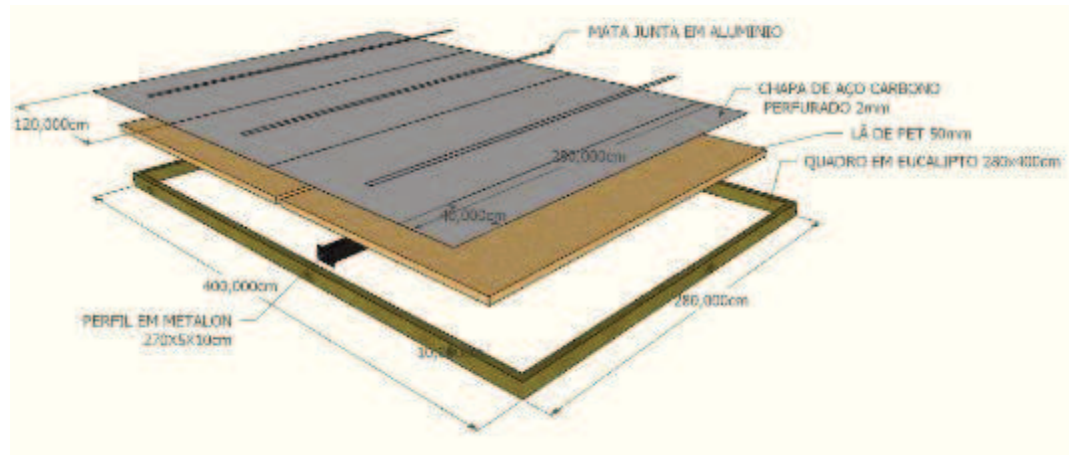
(c)

Fonte: Autor.

3.3.2 Projeto do Protótipo dos Painéis Acústicos

No projeto do protótipo dos painéis acústicos utilizado para a estrutura interna perfis de madeira de eucalipto, com secção de 10 x 5,0 cm, com o quadro desta estrutura possui 4,00 x 2,80 m, totalizando 11,20 m². Internamente, foi instalado um material fonoabsorvente em lã de pet, em placas de 1200 x 2500 mm, 50 mm de espessura, e 7 Kg/m³ de densidade. Para atender a EN 1798, foi instalado um perfil de metalon com dimensões de 5 x 10 cm, e espessura da parede da barra de 1 mm. A perspectiva ilustrada na Figura 46 apresenta o desenho em perspectiva do protótipo.

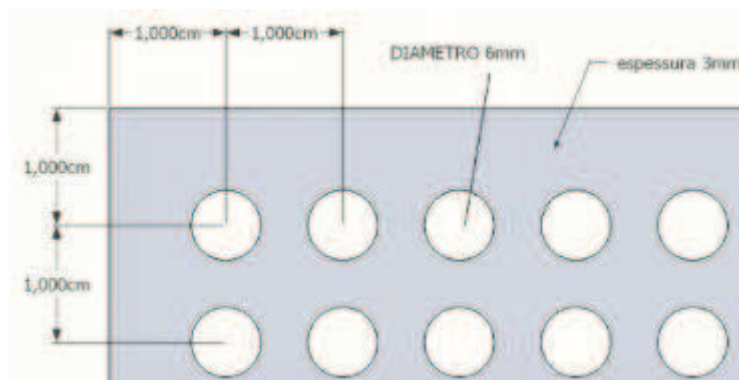
Figura 46 - Perspectiva do protótipo da barreira acústica e suas camadas de composição



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram utilizadas quatro chapas de aço carbono, sendo três com dimensões de 120 x 280 cm, e uma com 40 x 280 cm, todas com 2 mm de espessura, furos de \varnothing 6 mm e espaçamento entre eixos de 10 mm, com percentual de perfuração total de 28,27%, conforme ilustrado na Figura 47. A Frequência de Ressonância calculada conforme a Equação 5 foi de 1032,54 Hz, baseado em uma frequência mais restritiva, neste caso, de 1000 Hz. Foram utilizados perfis de alumínio fixados com silicone incolor para selar as juntas entre as chapas.

Figura 47 – detalhe da chapa de latão perfurada



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados em duas situações: o primeiro com a lâmina de Pet, e o segundo sem o material fonoabsorvente.

3.3.3 Ensaio de Absorção Sonora

Para o desenvolvimento de um protótipo de barreira acústica, um dos requisitos necessários é sua característica de absorção sonora. Para tanto, foi desenvolvido um modelo, e ensaiado em laboratório. Os procedimentos, e a expressão dos resultados das medições do coeficiente de absorção sonora seguiram as orientações da EN 1793-1 (BS EN, 1998) para a montagem do protótipo, e da ISO 354 (2003) para o ensaio em câmara reverberante.

De acordo com Egan (2014), a eficácia de um material para a absorção sonora poderá ser expressa pelo seu coeficiente de absorção (α). Esse coeficiente demonstra a fração de energia sonora que incide em um material, e é absorvida pelo mesmo. Pode variar de 0, ou seja, sem absorção sonora e 1,0; absorção sonora total, para o qual toda a energia incidente é absorvida. Esse coeficiente descreve a fração da energia sonora incidente que absorve um material.

O ensaio foi realizado dia 14 de dezembro de 2017, e ocorreu em dois turnos. Pela manhã foi realizada a montagem do protótipo na câmara reverberante, e a tarde realizado o ensaio, sendo o primeiro com a Lã de PET instalada na superfície inferior da chapa metálica, e o segundo sem o material fonoabsorvente, que ocorreu no dia 14 de março de 2018. O tempo total de ensaio foi de 12 minutos para cada situação, e ocorreu conforme descrito a seguir.

Para a medição do tempo de reverberação, ao cessar a fonte, deverá ser realizada médias de medição em variadas posições de microfones, sendo três o mínimo. Este tempo de reverberação é definido como o tempo em segundos para que o som decaia 60 dB após cessar a emissão da fonte. Estas medições deverão atender os pré-requisitos apontados na ISO 354, no que diz respeito às distâncias entre si, da distância da amostra, e das paredes da câmara.

A fonte sonora para ensaio com a amostra deve estar posicionada minimamente em duas posições, e atender os requisitos na referida norma, se obtendo no mínimo 12 posições independentes. Para isso, a ISO 354 apresenta dois procedimentos de medição: ruído interrompido, e resposta impulsiva integrada. Para esta dissertação, o ensaio teve como procedimento o ruído interrompido.

Este procedimento utiliza uma fonte alimentada por sinal de banda larga, que apresenta uma composição espectral contínua, e com diferenças entre os níveis de terço de oitava adjacentes até o limite de 6 dB.

Neste momento, a fonte sonora deve ser ligada por um período necessário para se obter um campo sonoro em estado estacionário dentro da câmara, e na sequência, desligada, obtendo-se desta forma as curvas de decaimento sonoro. O nível do sinal de excitação deve, antes do decaimento, ser de 10 dB acima do nível do ruído de fundo.

Para a realização do procedimento, inicialmente obtém-se a medição do coeficiente de absorção (α) em câmara reverberante para cada banda de frequência em um terço de oitava sobre a amostra em questão. Para a determinação deste coeficiente, a EN 1793-1 (BS EN, 1998) remete aos mesmos critérios da ISO 354.

Para tanto, devem ser calculados tempo de reverberação (TR) sem e com o protótipo montado, para cada banda de frequência, sendo expresso pela média aritmética do total de medições, conforme orientado pela ISO 354 (2003). Após as medições dos tempos de reverberação, é necessário calcular a área de absorção equivalente (A_1 e A_2) nas situações com a câmara vazia e com a amostra montada, respectivamente. Por conseguinte, é calculada a área de absorção equivalente (A_T), em metros quadrados, que relaciona os tempos de reverberação e áreas de absorção sonora nas situações sem e com a amostra montada, conforme equação 7.

$$A_T = A_2 - A_1 = 55,3V \left(\frac{1}{c_2 T_2} - \frac{1}{c_1 T_1} \right) - 4V (m_2 - m_1)$$

Equação 7

Sendo que,

A_1 é a área de absorção sonora equivalente sem a amostra, expresso em metros quadrados;

A_2 é a área de absorção sonora equivalente com a amostra montada, expresso em metros quadrados;

C_1 e C_2 são a velocidade do som no ar, em metros por segundo;

T_1 é o tempo de reverberação da sala vazia, expresso em segundos;

T_2 é o tempo de reverberação da sala com a amostra montada, expresso em segundos;

m_1 e m_2 é o coeficiente de atenuação de potência, usando as condições climáticas que se apresentarem na sala de reverberação vazia durante o ensaio;

V é o volume da câmara, dado em metros cúbicos;

Por fim, a equação 8 deverá ser utilizada para calcular o coeficiente de absorção sonora (α_s) para cada banda de frequência. O subscrito “s” é utilizado nesta norma para diferenciar, e evitar confusão com o coeficiente de absorção de som definido como a porção de energia não refletida de uma onda plana que incide em uma parede plana em um determinado ângulo de incidência.

$$\alpha_s = \frac{AT}{S}$$

Equação 8

Sendo,

AT é a área de absorção do som equivalente da amostra do ensaio, expresso em metros quadrados;

S é a área da amostra, dada em metros quadrados.

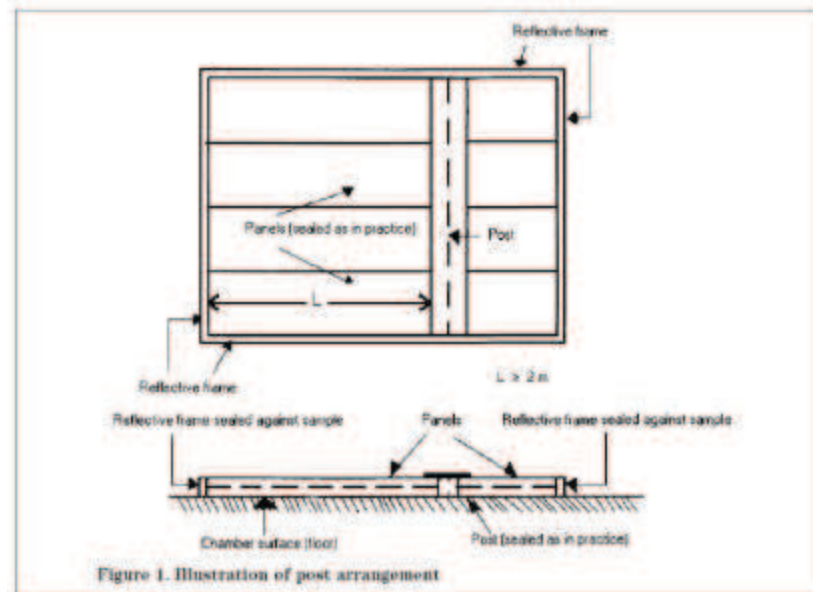
Para a determinação do coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) os critérios adotados foram os mesmos determinados pela ISO 11654 (1997).

A montagem do protótipo seguiu as orientações da EN 1793-1 (BS EN, 1998), que recomenda os seguintes critérios:

- a) a forma de montagem, selamento entre componentes e conexões deve ser realizada no laboratório da mesma maneira que a fabricação do dispositivo;
- b) a amostra deve ser montada com um painel de no mínimo 2 m, e um poste de ligação e complementado com a dimensão restante até fechar a dimensão mínima requerida pela norma, que é para uma área de 10 a 12 m²;
- c) o quadro da estrutura do protótipo deve ter uma relação para a largura de 70% da dimensão do comprimento;
- d) a face virada para a fonte deve estar para cima, com o mínimo possível de distância entre a parte de trás do corpo de teste, e o chão da câmara.

A Figura 48 mostra o detalhe da instalação do quadro e do poste de ligação entre os painéis.

Figura 48 – Esquema da instalação do poste de ligação entre os painéis para a realização do ensaio



Fonte: EN 1793-1 (1998).

Os ensaios aconteceram no Instituto de Tecnológico em desempenho e construção civil da Unisinos – itt Performance – e seguiram o recomendado pelas normas abordadas anteriormente. A câmara reverberante com geometria irregular apresenta as paredes não paralelas entre si, com objetivo de garantir um campo sonoro difuso. Possui volume cúbico de 200,33 m³, e área total interna do piso de 59,80 m². O espaço possui 20 painéis difusores de acrílico, em formato côncavo, suspensos no teto da câmara, conforme Figura 49.

Figura 49 – Foto da câmara reverberante do itt performance da Unisinos



Fonte: Registrada pelo autor.

Para a montagem do protótipo em câmara reverberante, os critérios utilizados para a colocação da estrutura foram conforme a EN 1793-1 (BS EN, 1998),

apresentados anteriormente na Figura 48. A instalação, portanto, ocorreu com os seguintes passos:

- a) Disposição das peças principais sobre o chão da câmara, sendo a estrutura de 4,00x2,80 de madeira de eucalipto com seção de 5x10cm. A distância da face superior da estrutura de madeira para o chão ficou em 10cm (câmara de ar), conforme a Figura 50a;
- b) Com a estrutura de madeira fixada, foi posicionado o poste de metalon com dimensões de 5x10cm e comprimento de 2,70m. O mesmo foi parafusado na estrutura de madeira, de acordo com a Figura 50b;
- c) Em seguida, a lã de PET foi estendida sobre o chão para aplicação de cola (Figura 50c), sendo a mesma fixada na parte posterior dos painéis de chapa metálica que foram previamente limpas para garantir a adesão da cola sob a sua superfície;
- d) Com o material absorvente aplicado sobre os painéis, foi realizada a fixação das chapas de metal sobre a estrutura de madeira, e do poste de metalon, vide Figura 50d;
- e) A Figura 50e ilustra a última etapa, que consistiu em fixar os perfis de acabamento em alumínio (mata juntas) colado com silicone incolor.

A Figura 50 apresenta as etapas da montagem, conforme descrito acima.

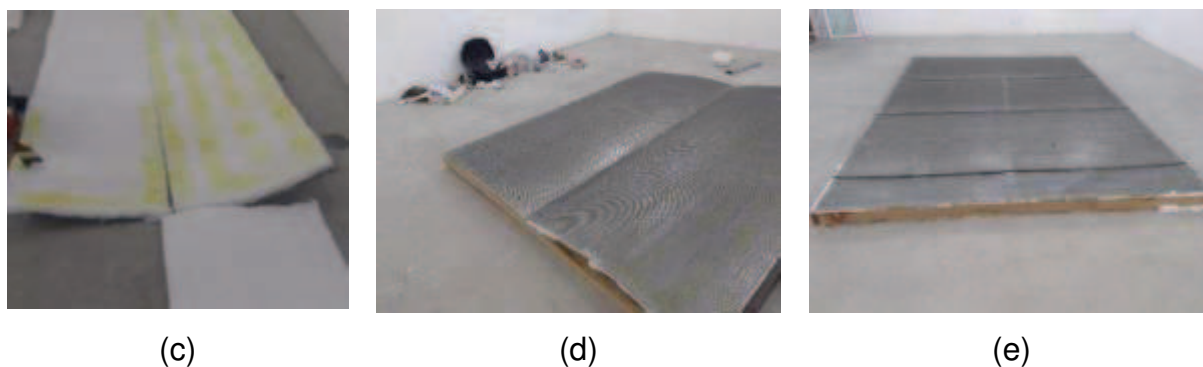
Figura 50 – Etapas de montagem da amostra na câmara reverberante



(a)



(b)



Fonte: Registrada pelo autor.

Antes da realização do ensaio, foi executada a medição de temperatura e umidade com equipamento *Instrutemp ITMP 600*. Os valores apresentados foram posteriormente registrados em formulário padrão. Este equipamento foi instalado sobre um tripé no centro da câmara, e permaneceu no recinto por 30 segundos até a sua leitura.

Para a realização das medições, os equipamentos utilizados foram o analisador sonoro ACOEM, modelo 01dB; com microfone G.R.A.S modelo 40AO, classe 1; fonte sonora de ruído com 12 autofalantes, da Bruel & Kjaer, modelo 4292-L, sendo as manutenções e calibrações dos respectivos instrumentos realizadas conforme plano de manutenção do itt Performance. Assim, a fonte foi ligada por tempo suficiente para se obter o decaimento dos níveis de pressão sonora sem, e com o protótipo montado.

Com o protótipo montado, o equipamento para realização do ensaio foi instalado conforme a Figura 51, sendo que as medições ocorreram por aproximadamente 11 minutos em 12 posições distintas.

Figura 51 – Posicionamento da fonte sonora no interior da câmara reverberante



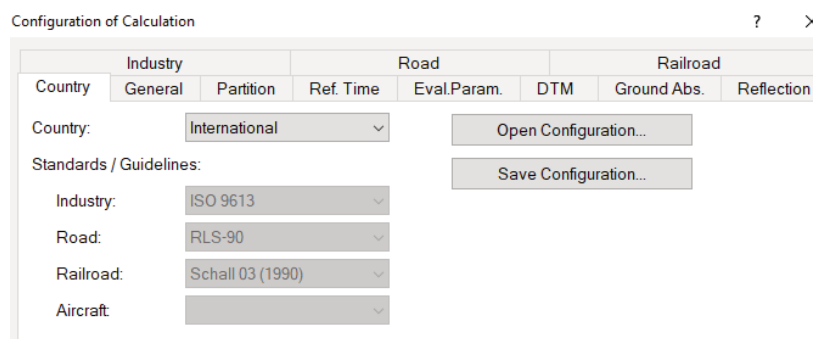
Fonte: Registrada pelo autor.

3.3.4 Simulação Computacional

Para a avaliação de uma situação real de instalação da barreira confeccionada com os painéis perfurados, foram realizadas estimativas dos níveis de pressão sonora incidentes nas fachadas das edificações vizinhas às duas escolas. Foi utilizado o *software* CadnaA® para cálculos de ruído ambiental, que considera em seu algoritmo as variáveis de propagação do som ao ar livre, bem como as características de reflexão, absorção, refração e difração dos elementos sólidos edificados.

Para a inserção dos dados no *software*, foi necessário a inserção dos dados na configuração de cálculo, sendo que os itens foram idênticos em ambos os projetos. Nesta janela de inserção dos dados iniciais do programa, foram inseridas informações, tais como: a norma que se aplica os estudos do ruído ambiental, e a absorção do solo, conforme Figura 52.

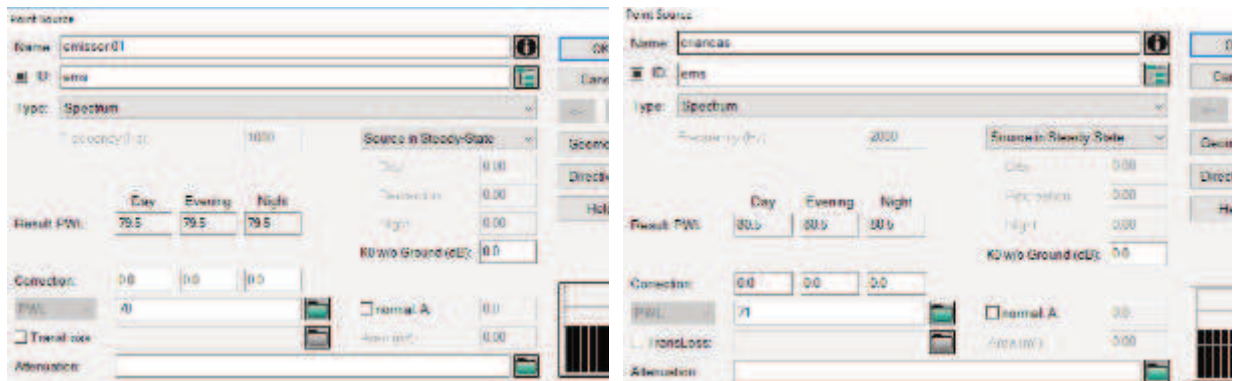
Figura 52 - Janela de inserção dos dados para a configuração dos cálculos de ruído ambiental



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a inserção dos dados, o arquivo com a extensão dxf contendo a planta do projeto é exportado para o *software* de simulação acústica. Na sequência, foram localizados os pontos do emissor (fonte pontual) de acordo com as posições identificadas nos ensaios de campo, e configurados quanto as suas características espectrais, de altura e o L_{Aeq} máximo, que foi registrado como sendo de 70 dB na escola JC e 71 dB na escola UP. Para a fonte sonora foi considerado 1,00 m de altura em ambos projetos. A Figura 53 apresenta a janela de configuração do *software* para os itens relacionados aos emissores.

Figura 53 - Janela de configuração dos dados relativos aos emissores, sendo (a) para a escola JC e (b) para a escola UP.



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os dados inseridos quanto aos espectros sonoros medidos em campo foram acrescentados no *software*, conforme Figura 54.

Figura 54 - Janela de configuração dos espectros sonoros dos emissores na escola JC (a) e escola UP (b)

Point Source

Sound Levels (local)

Name	ID	Type	Weight	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	lin	Source
		Li		56.0	56.2	53.5	55.5	60.0	62.7	61.1	58.3	55.0	67.1	68.1	
		Li		51.0	51.9	47.3	47.7	56.0	57.8	54.5	49.1	44.8	61.1	62.5	
		Li		52.0	52.4	50.4	54.3	61.3	67.2	64.0	59.5	58.0	70.4	70.6	

(a)

Sound Levels (local)

Name	ID	Type	Weight	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	A	lin	Source
		Li		55.0	55.9	50.2	45.8	53.5	61.2	64.2	56.6	46.7	67.4	67.4	
		Li		57.0	57.3	53.5	49.5	53.5	61.5	68.7	61.0	50.9	71.1	70.7	

(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quanto aos receptores, na escola JC foi configurado com 1,20 metros de altura, e para a escola UP com altura de 4,20m, por estar localizado no segundo pavimento do edifício vizinho. Também foram inseridas as informações dos níveis critérios de avaliação (NCA) admitidos para os períodos diurno, e noturno. A Figura 55 apresenta a janela de configuração com os dados inseridos.

Figura 55 - Janela de configuração dos dados relativos aos receptores na escola JC (a) e escola UP (b)

Receiver

Name: receptor

ID: rec

Land Use: (ohne Nutzung)

Determine from Areas of Land Use

Use Standard Values for: Total

Standard Level (dBA): Day 50.0 Night 45.0

Sound Pressure Level (dBA): Day 58.2 Night 58.2

Excess Level (dB): Day 8.2 Night 13.2

Generate Rays (as Aux.Polygons)

Level Spectrum dB(A):

Typ	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Day	54.2	52.4	49.9	47.5	44.9	42.2	39.5	38.5	38.0
Night	54.2	52.4	49.9	47.5	44.9	42.2	39.5	38.5	38.0

(a)

Receiver

Name: receptor_02

ID: rec02

Land Use: (ohne Nutzung)

Determine from Areas of Land Use

Use Standard Values for: Total

Standard Level (dBA): Day 50.0 Night 45.0

Sound Pressure Level (dBA): Day 57.2 Night 57.2

Excess Level (dB): Day 7.2 Night 12.2

Generate Rays (as Aux.Polygons)

Level Spectrum dB(A):

Typ	31.5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Day	51.9	50.7	49.0	47.9	46.7	44.8	42.6	39.9	37.1
Night	51.9	50.7	49.0	47.9	46.7	44.8	42.6	39.9	37.1

(b)

Fonte: Autor.

Com estas informações, foi possível calcular os níveis sonoros nas áreas de playground, com o objetivo de comparar os resultados da simulação com as medições realizadas no local. Após, foi inserida a barreira acústica, e simulado os resultados em duas situações: com e sem o acabamento de topo. A Tabela 7 apresenta as estratégias de simulação utilizadas para a análise de resultados em três situações.

Tabela 7 - Estratégias utilizadas para a simulação acústica nas áreas de playground em ambas escolas

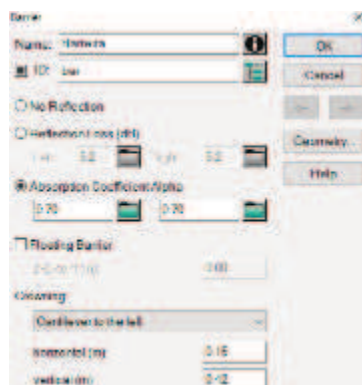
Estratégia	Objetivo
Simulação sem a inserção da barreira acústica	Comparar com as medições realizadas em campo e proceder a correção dos valores
Inserção da barreira acústica conforme projeto	Verificar a eficácia do obstáculo acústico e a sua consequente redução dos níveis sonoros
Inserção da barreira acústica sem o acabamento de topo	Verificar a eficácia do acabamento de topo da barreira

Fonte: Elaborada pelo autor.

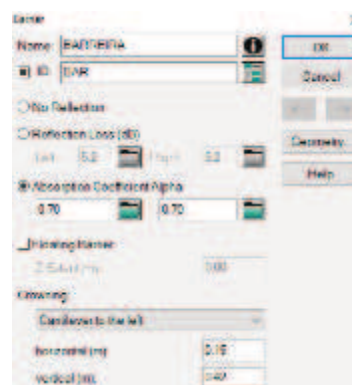
Para a inserção da barreira acústica nos locais especificados em projeto, a configuração dos dados foi realizada conforme a Figura 56, considerando as

informações de altura, inclinação de topo, e o coeficiente de absorção sonora do protótipo obtido no ensaio em câmara reverberante.

Figura 56 – Janela de configuração de inserção da barreira acústica na escola JC (a) e UP (b)



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

O item da janela de inserção de dados identificado como *crowning* é relativo ao acabamento de topo, sendo que para a opção que não contempla esta estratégia basta selecionar a opção *none*. Importante ressaltar que o software utilizado foi na versão em português, onde foi verificado que a tradução está equivocada quanto a opção horizontal (m), que na verdade trata da inclinação do acabamento do topo da barreira, dada em graus.

Sendo assim, as configurações necessárias foram realizadas, e após se procedeu os cálculos dos NPS resultantes para as três situações citadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSAO

Os dados relativos às medições acústicas, e a análise dos resultados são apresentados por assunto, sendo o primeiro, e segundo relativos às escolas JC e UP, respectivamente. Na sequência serão apresentados os resultados, e discussões acerca dos itens: ensaio de absorção em câmara reverberante, e simulação computacional.

4.1 EMEI JARDIM CAMAQUÃ- JC

Os resultados das medições, e a discussão dos dados adquiridos serão apresentadas primeiramente para a área de playground (externas), e na sequência para os ambientes internos da escola infantil JC.

4.1.1 Medições Externas

A umidade relativa, e a temperatura do ar medidos no dia dos ensaios são demonstrados na Tabela 8. A Tabela 9 apresenta a identificação dos pontos, o nível equivalente, ponderado, e a frequência em bandas de oitava, sendo que a classificação do ruído emitido foi como sendo contínuo.

Tabela 8 – Temperatura e umidade relativa das medições externas

Ponto	Temperatura (°c)	Umidade Relativa (%)
E1P2	20,4	62,7
E1P1	21,0	61,9
E1P3	21,3	61,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 9 - Dados das medições acústica externas da escola JC

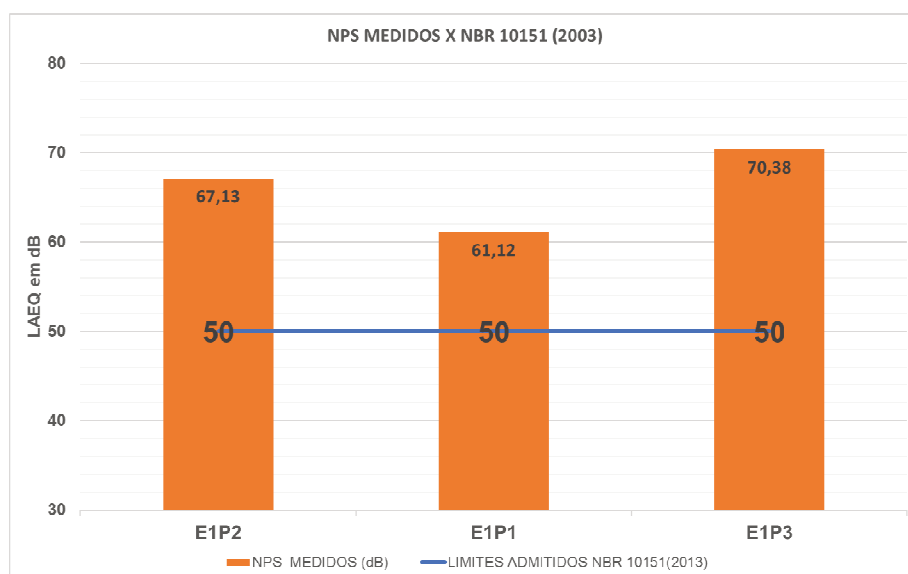
Pontos	NPS por bandas de oitava (dB)								L _{Aeq} (dB)
	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1k	2k	4k	8k	
E1P2	56,16	53,51	55,55	59,95	62,66	61,07	58,31	55,05	67,13
E1P1	51,88	47,31	47,70	56,01	57,75	54,49	49,10	44,76	61,12
E1P3	52,41	50,37	54,27	61,32	67,24	64,00	59,55	57,96	70,38

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores relativos a umidade, e temperatura estão muito próximos, e não apresentaram discrepância. Quanto a análise dos NPS medidos para cada ponto, foi possível verificar que a banda de frequências predominante (aquela que apresentou os maiores valores) foi na faixa de 1.000 Hz. Desta forma, foi possível calcular o comprimento de onda da banda de frequência predominante, utilizando a Equação 01. Portanto, o λ calculado para o espectro sonoro das crianças foi de 0,34 m.

Conforme abordado anteriormente, a Tabela 2 apresentou os níveis máximos admitidos em áreas externas em locais residenciais, segundo a NBR 10151 (ABNT, 2003) para o período diurno o limite é de 50 dB, e noturno de 45 dB, considerando estes valores no filtro de ponderação A. A Figura 57 apresenta o gráfico comparativo entre os níveis de pressão sonora medidos, e a comparação com o valor admitido em horário diurno para áreas externas na escola JC.

Figura 57 – Comparação entre o NPS mais elevado medido na escola JC com o NPS diurno preconizado pela NBR 10151 (2003)



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise desta figura permite verificar que todos os pontos medidos extrapolam o limite indicado pela norma. Sendo que o ponto E1P3 apresenta o maior valor em L_{Aeq} , provavelmente devido as reflexões causadas pela parede do bloco administrativo. O valor encontrado do L_{Aeq} neste ponto foi o utilizado para a entrada de dados nas simulações computacionais. Para efeitos de análise, o valor de 70,38 dB foi arredondado para 70 dB. Com isto, foi permitido concluir que o valor de 20 dB ultrapassa o limite máximo admitido para áreas externas.

4.1.2 Medições Internas

Os dados relativos a umidade relativa e temperatura do ar medidos no dia do ensaio de campo estão indicados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados das medições internas na residência vizinha à escola JC

Ponto	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
E1P4	21,0	61,7
E1P5	20,1	62,5
E1P6	19,8	63,6

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 11 apresenta os resultados dos pontos internos medidos por faixas de frequência nas bandas de oitava, e os resultados dos níveis de pressão sonora equivalentes no filtro de ponderação A para cada ponto medido.

Tabela 11 – Resultados das medições internas na residência vizinha à escola JC

Pontos	NPS por bandas de oitava (dB)								L _{Aeq} (dB)
	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1k	2k	4k	8k	
E1P4	51,35	48,28	51,5	56,71	62,95	59,46	53,85	50,56	65,77
E1P5	50,87	46,2	48,17	48,81	54,43	54,32	47,1	40,03	58,77
E1P6	49,25	47,51	52,1	58,76	65,71	63,78	56,55	50,16	68,98

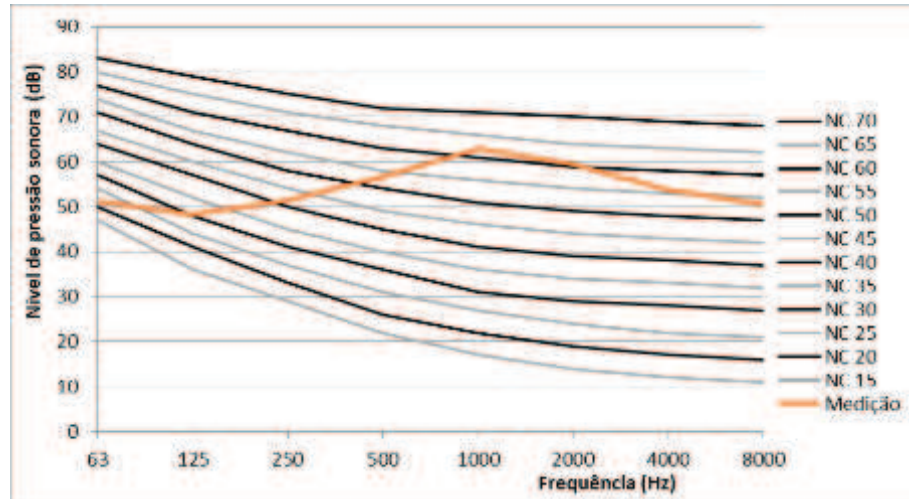
Fonte: Elaborada pelo autor.

Da mesma forma que nas medições externas, a frequência de 1.000 Hz foi a predominante para o espectro sonoro dos emissores.

Para a área interna do ambiente de sala de estar, a NBR 10152 (ABNT, 2017) fixa o valor de 40 dB, admitindo uma margem de até 5 dB para um valor superior, ou inferior ao fixado. A escola JC apresentou o nível de pressão sonora mais elevado na medição do ponto E1P6, com valor de 69 dB, sendo que este ponto foi medido com a janela aberta, e ao fundo do ambiente. Sendo assim, este ponto extrapola em 24 dB o limite estabelecido pela NBR 10152 (ABNT, 2017). Todos os pontos internos apresentaram valores superiores ao fixado pela norma, inclusive acima da tolerância de 5 dB.

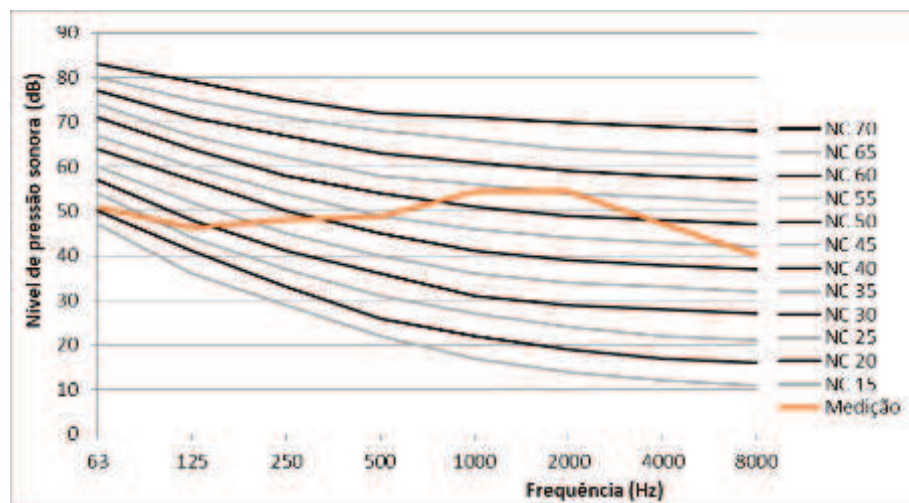
As Figuras 58, 59 e 60 apresentam os espectros sonoros plotados sobre as curvas NC.

Figura 58 - Espectro sonoro do ponto E1P4



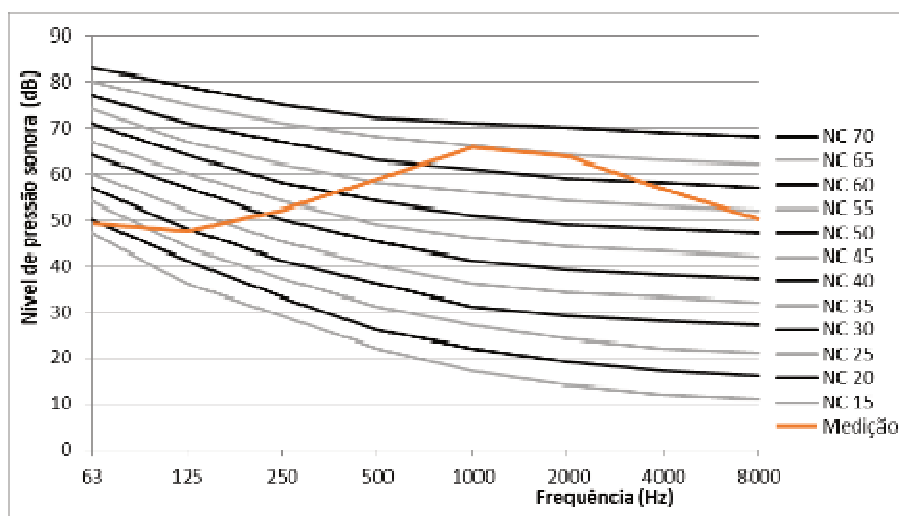
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 59 – Espectro sonoro do ponto E1P5



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 60 – Espectro sonoro do ponto E1P6



Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, para a classificação do nível de pressão sonora é necessário plotar o espectro sonoro sobre os gráficos das curvas NC, a curva imediatamente superior ao ponto mais elevado será a que definirá o ruído para fins de classificação. A Tabela 12 apresenta, conforme os espectros sonoros dos pontos de medição, as curvas NC classificadas para os três pontos medidos internamente na residência vizinha à escola JC.

Tabela 12 – Classificação das curvas NC dos espectros sonoros dos pontos internos da residência vizinha à escola JC

Ponto	Curva NC
E1P4	65
E1P5	60
E1P6	70

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 EMEI UNIDOS DA PAINEIRA- UP

Para a escola UP, os resultados das medições, e a discussão dos mesmos será apresentado primeiramente para a área externa, e posteriormente para o ambiente interno do apartamento vizinho à escola.

4.2.1 Medições Externas

Os registros de umidade relativa e temperatura no dia da medição estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Registro das umidades relativas e temperatura para os pontos externos medidos na escola UP

Ponto	Temperatura (°c)	Umidade Relativa (%)
E2P2	21,3	70,5
E2P1	21,4	70,7

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 14 apresenta os valores medidos dos NPS por faixa de frequência nas bandas de oitava, bem como o L_{Aeq} para cada ponto.

Tabela 14 – Níveis de pressão sonora medidos externamente na escola UP

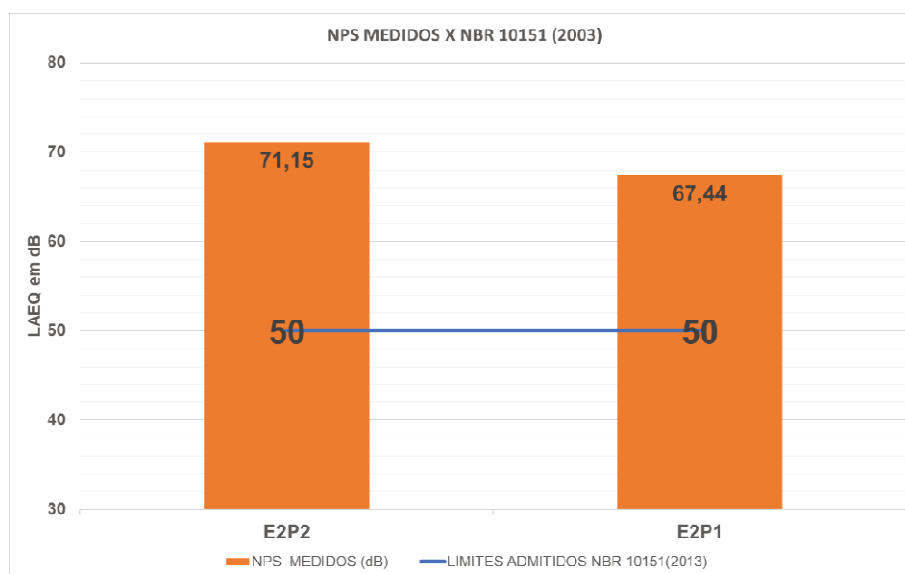
Pontos	NPS por bandas de oitava (dB)								L_{Aeq} (dB)
	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1k	2k	4k	8k	
E2P2	57,3	53,54	49,47	53,53	61,49	68,71	61,04	50,94	71,15
E2P1	55,89	50,22	45,82	53,48	61,18	64,24	56,62	46,74	67,44

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os valores da temperatura, e umidade relativa foram praticamente os mesmos para ambas medições. Os pontos E2P2, e E2P1 apresentaram a frequência predominante de 2.000 Hz. Com estes dados, o comprimento de onda calculado para a escola UP foi de 0,17 m.

A Figura 61 apresenta o gráfico comparativo entre os níveis de pressão sonora medidos, e a comparação com o valor admitido em horário diurno para áreas externas na escola UP.

Figura 61 – Comparação entre o NPS mais elevado medido na escola UP com o NPS diurno preconizado pela NBR 10151 (2003)



Fonte: Elaborada pelo autor.

O ponto E2P2 apresentou o valor mais elevado para o LAEQ, que arredondado, passou a ser considerado de 71 dB. Com isso, o valor excedido do NPS limitado pela norma foi de 21 dB.

4.2.2 Medições Internas

A temperatura e umidade relativa estão destacados na Tabela 15.

Tabela 15 – Temperatura e umidade relativa do ar nas medições internas na residência vizinha à escola UP

Ponto	Temperatura (°c)	Umidade Relativa (%)
E2P3	19,0	72,3
E2P4	19,0	72,3
E2P5	19,3	72,4

Fonte: Elaborada pelo autor.

As medições dos três pontos internos estão identificadas na tabela 16, e apresentam os resultados por faixa de frequência nas bandas de oitava, e o LAeq para cada ponto medido.

Tabela 16 – NPS medidos na sala de estar do vizinho da escola UP

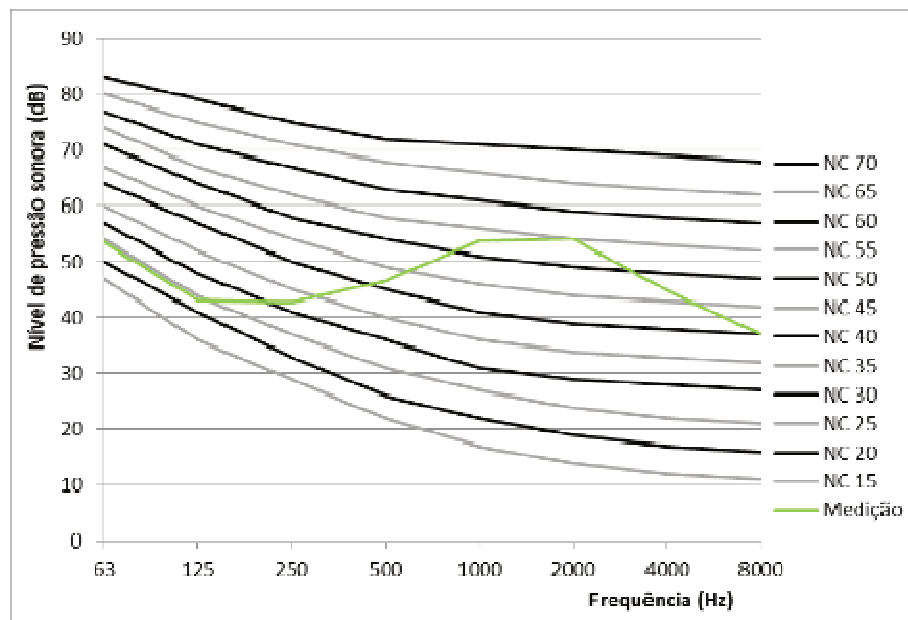
Pontos	NPS por bandas de oitava (dB)								L _{Aeq} (dB)
	63 Hz	125Hz	250Hz	500Hz	1k	2k	4k	8k	
E2P3	53,5	43,06	42,73	46,58	53,71	54,06	44,88	37,04	58,05
E2P4	48,03	40,16	38,95	43,33	50,67	48,84	39,88	34,36	53,87
E2P5	50,11	40,38	36,21	36,61	44,42	43,54	35,10	26,8	53,87

Fonte: Elaborada pelo autor.

A frequência predominante para os pontos internos também foi de 2000Hz. Na relação com o limite estabelecido pela NBR 10152 (ABNT, 2017), todos os pontos ultrapassam o valor estipulado. O ponto E2P3 foi o que apresentou a maior diferença, ficando 13 dB acima do valor preconizado, se considerado a tolerância.

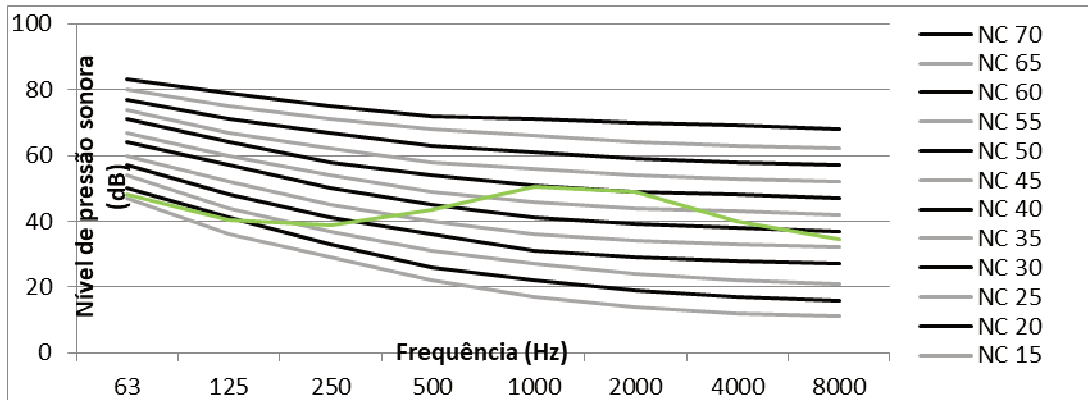
Os espectros sonoros das medições realizadas estão expressos conforme as Figuras 62, 63 e 64.

Figura 62 – Espectro sonoro do ponto de medição E2P3



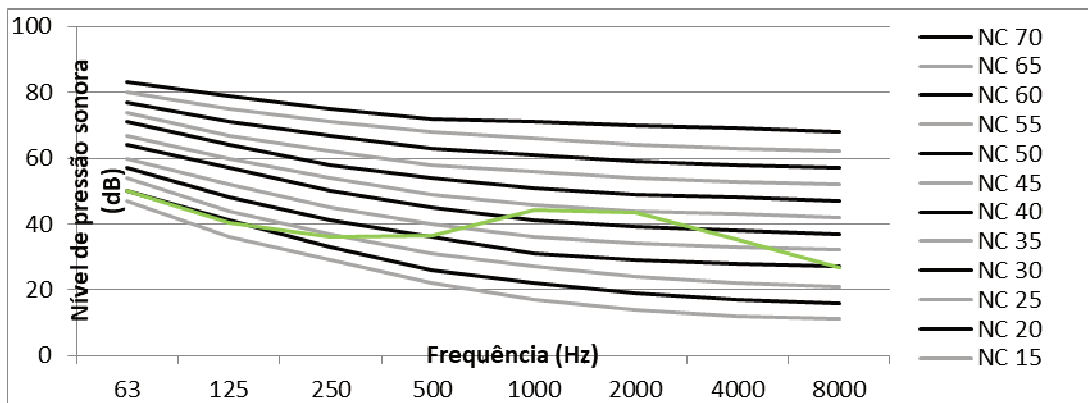
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 63 – Espectro sonoro do NPS do ponto E2P4



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 64 – Ponto E2P5 representado pelo seu espectro sonoro



Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta forma, foi possível classificar as curvas sonoras de acordo com as curvas NC, conforme apresentado na NBR 10152. A Tabela 17 apresenta a classificação.

Tabela 17 - Classificação das curvas NC dos espectros sonoros dos pontos internos da residência vizinha à escola UP

Ponto	Curva NC
E2P3	60
E2P4	55
E2P5	50

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 ENSAIO DE ABSORÇÃO SONORA EM CÂMARA REVERBERANTE

Os procedimentos foram realizados conforme abordado no capítulo método, e seguiu os requisitos das normas EN 1793-1 (BS EN, 1998) e ISO 354 (BS EN, 2003).

As medições de temperatura, e umidade relativa do ar com, e sem a amostra estão registradas na Tabela 18.

Tabela 18 - Registro da temperatura e umidade relativa do ar na câmara reverberante

-	S/ amostra	C/ amostra e material fonoabsorvente	C/ a amostra e sem material fonoabsorvente
Temperatura (°C)	31,2	31,6	24,7
Umidade (%)	55,2	55,3	67,5

Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente se mediu o Tempo de Reverberação da câmara reverberante sem a amostra (TR1). Após, foi medido o tempo de reverberação com a amostra montada (TR2) com a Lã de PET, e por último o Tempo de Reverberação (TR3) com a amostra montada sem a lã de PET, assim expresso pela Tabela 19. Os valores expressados foram obtidos por média aritmética dentro das faixas de oitava.

Tabela 19 – Tempos de reverberação medidos: TR1, TR2 e TR3

Frequência (Hz)	TR1 (s)	TR2 (s)	TR3(s)
125	8,6	4,85	10,42
250	7,34	2,71	5,14
500	7,39	2,48	4,48
1000	6,69	2,52	4,3
2000	5,34	2,26	3,4
4000	3,52	1,77	2,53

Fonte: Elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos do coeficiente de absorção sonora segundo as ISO 354 (α_s), e 11654 (α_w) são apresentados em duas situações: com e sem o material fonosorvente.

4.3.1 Amostra com e sem o Material Fonoabsorvente

Para melhor compreensão dos resultados expressados, foi adotado $\alpha_s 1$ para o protótipo com o material fonosorvente, e $\alpha_s 2$ para a amostra sem este material.

Por intermédio da equação 8, pode-se determinar o coeficiente de absorção sonora (α_s) para ambas as situações. A Tabela 20 apresenta os resultados do coeficiente de absorção sonora para o protótipo montado com ($\alpha_s 1$), e sem ($\alpha_s 2$) a Lã de PET.

Tabela 20 – Coeficiente de absorção sonora do protótipo

Frequência (Hz)	$\alpha_s 1$	$\alpha_s 2$
125	0,25	0,00
250	0,66	0,17
500	0,76	0,25
1000	0,70	0,24
2000	0,72	0,30
4000	0,79	0,32

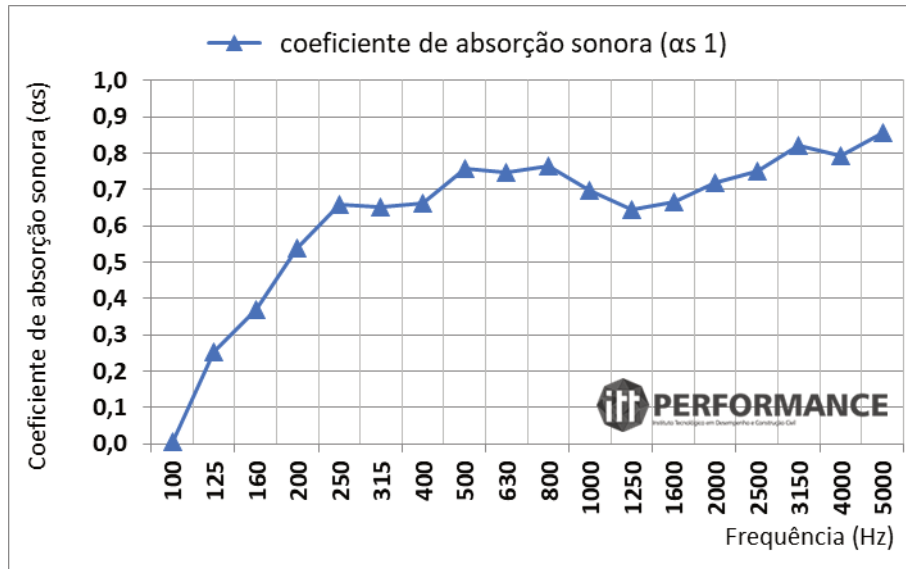
Fonte: Elaborada pelo autor.

Desta análise, é possível perceber que o coeficiente de absorção sonora (α_s) do protótipo com a lã de PET é bastante elevado nas frequências dos 500 Hz e 400 Hz. Os valores das frequências de 1000 Hz e 2000 Hz ficaram bastante próximos, sendo estas as frequências predominantes nos casos dos espectros sonoros dos emissores em ambas as escolas. Para a situação em que a amostra não possui material fonosorvente, o melhor coeficiente encontrado foi na frequência de 4000 Hz. O pior resultado foi nas baixas frequências. Para as frequências predominantes, a de 2000 Hz apresentou um coeficiente de absorção sonora superior a frequência de 1000 Hz.

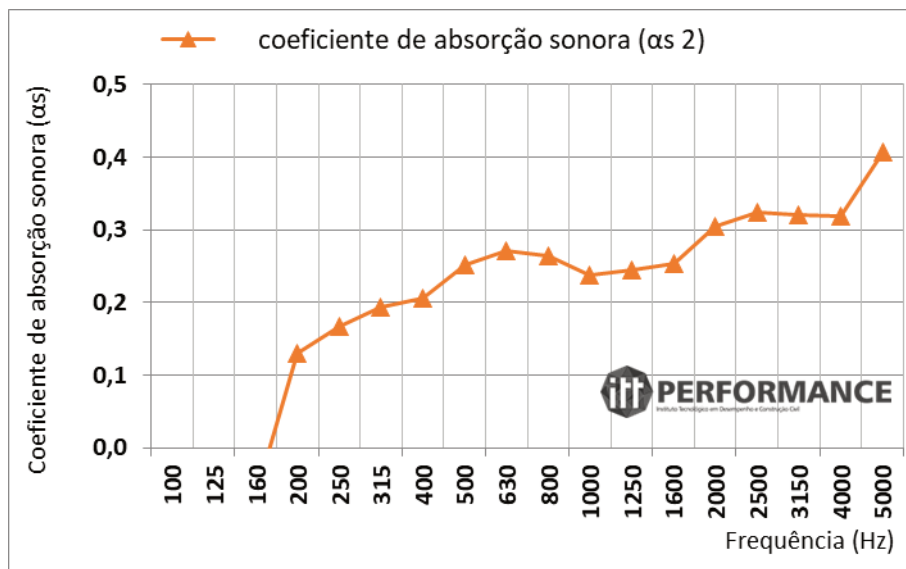
A Figura 65 apresenta os gráficos dos coeficientes de absorção sonora em duas situações: $\alpha_s 1$ - com material fonosorvente (a), e $\alpha_s 2$ - sem material

fonoabsorvente (b) para as faixas de frequência em bandas de oitava para o protótipo, segunda a ISO 354.

Figura 65 – Coeficiente de absorção sonora (α) da amostra com e sem o material fonoabsorvente



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de  Performance (2018).

O coeficiente de absorção sonora ponderado (α_w) calculado; segundo a ISO 11654 (BS EN, 1997), para a amostra com material fonoabsorvente foi de 0,7. Para o ensaio sem o material de absorção sonora o α_w resultante foi de 0,3. A Tabela 21

apresenta os dados por frequência em bandas de oitava encontrados nas medições para o coeficiente prático de absorção sonora (α_{pi}) nas seguintes situações: com material fonoabsorvente (α_{pi} 1), e sem o material fonoabsorvente (α_{pi} 2). Este coeficiente é utilizado para o cálculo ponderado do coeficiente α_w .

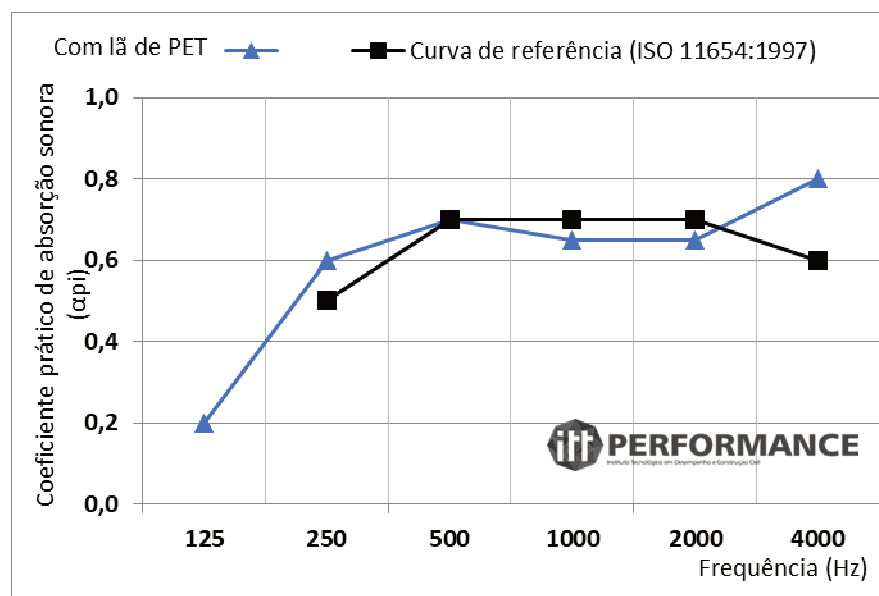
Tabela 21 – Valor do coeficiente prático de absorção sonora por faixa de frequência

Frequência Hz	α_{pi} 1	α_{pi} 2
125	0,20	-0,05
250	0,60	0,15
500	0,70	0,25
1000	0,65	0,25
2000	0,65	0,30
4000	0,80	0,35

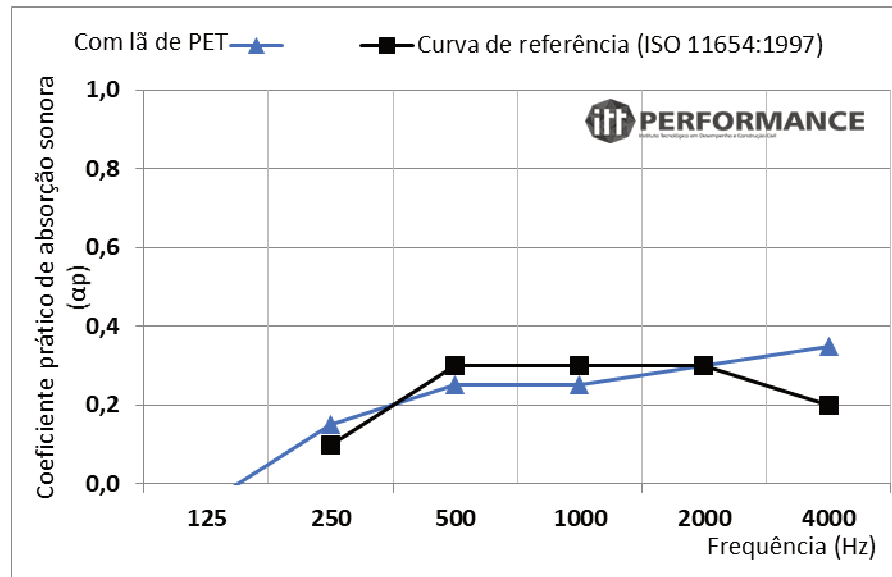
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 66 apresenta o gráfico do coeficiente de absorção sonora em relação à curva de referência dada pela ISO 11654. Os valores são expressos em (a) com a lã de PET, e (b) sem a lã de PET.

Figura 66 - Curva de referência para avaliação do coeficiente de absorção sonora



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Performance (2018).

Portanto, o coeficiente de absorção sonora ponderado adotado para o trabalho foi o da amostra com o material fonoabsorvente, que apresentou um valor de 0,7. O valor de 0,3 foi o calculado para a amostra sem a lã de PET, evidenciando assim o papel relevante do material fonoabsorvente.

4.4 SIMULAÇÃO ACÚSTICA NO SOFTWARE CADNAA®

Após as configurações necessárias dos dados de entrada do *software*, foram realizadas as simulações nas situações sem a barreira sonora, e com a barreira sonora em dois cenários: com e sem o acabamento de topo. Os resultados serão expressos por escola nas três situações propostas. A Tabela 22 auxilia na compreensão das estratégias de simulação para as escolas JA e UP.

Tabela 22 – Estratégia de simulação acústica em ambas escolas

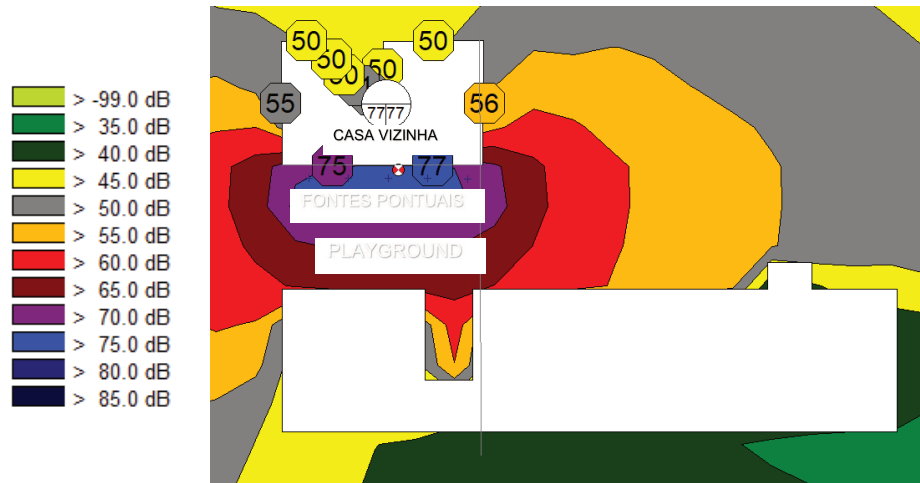
Escola	Estratégia de simulação
JA e UP	Sem a barreira acústica
	Com a barreira acústica
	Com a barreira acústica sem acabamento de topo

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.1 EMEI Jardim Camaquã

A Figura 67 apresenta a vista superior da escola, e a da residência vizinha na situação sem a barreira acústica, simulando a situação real, e sua conseqüente propagação sonora.

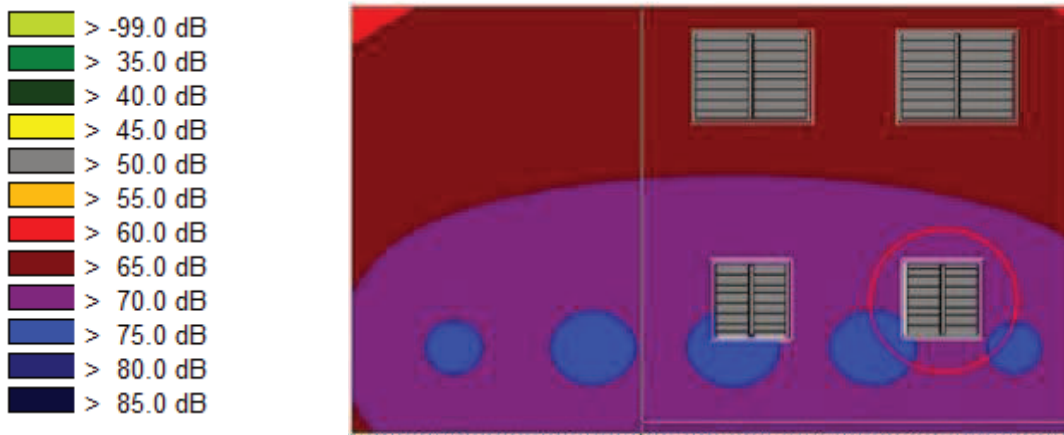
Figura 67 – Vista superior da simulação acústica da escola JC sem a barreira sonora



Fonte: Elaborada pelo autor.

A aproximação das fontes pontuais (crianças) da residência vizinha emite elevados NPS. Pela simulação, os valores dos níveis de pressão sonora que atingem o receptor estão no intervalo de 70 a 65 dB. A Figura 68 apresenta uma imagem da simulação sobreposta ao plano da fachada, onde se pode observar que a janela do Home office recebe uma pressão sonora de 70 dB, e o andar superior 65 dB.

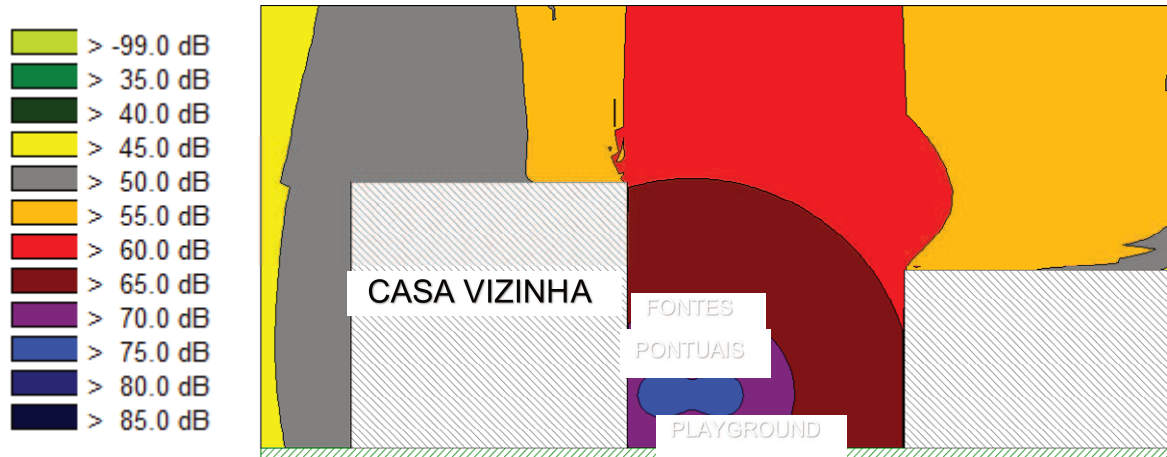
Figura 68 – Estimativa de ruído da fachada da residência vizinha



Fonte: Elaborada pelo autor.

O corte esquemático apresentado na Figura 69 demonstra a proximidade das fontes sonoras pontuais (crianças), e a residência vizinha, evidenciando os elevados níveis de pressão sonora na fachada da residência.

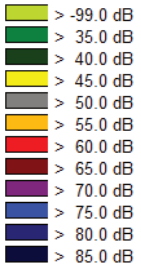
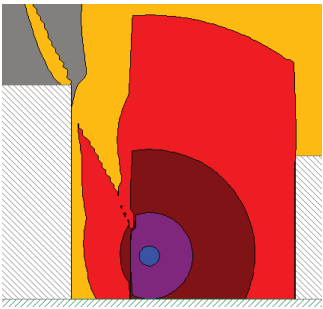

Figura 69 – Corte esquemático

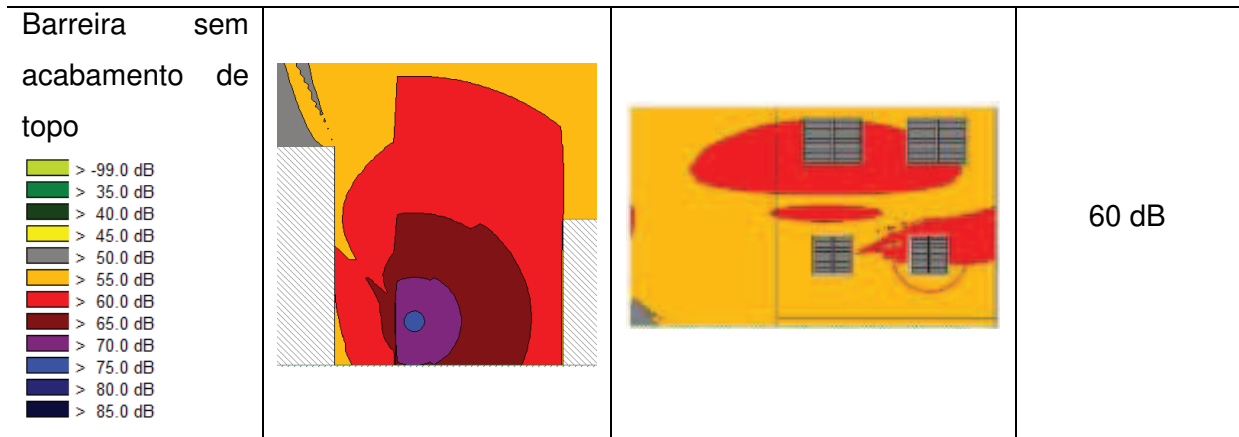


Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 23 compara os níveis de pressão sonora resultantes da inserção da barreira acústica em duas situações: com e sem o acabamento de topo. A janela do home office está destacada com um círculo vermelho. A barreira foi posicionada a 1,50 metros de distância da casa do vizinho.

Tabela 23 – Comparação entre a inserção da barreira sonora com e sem acabamento de topo

Estratégia	Corte	Fachada	NPS predominante
Barreira com acabamento de topo 			55 dB

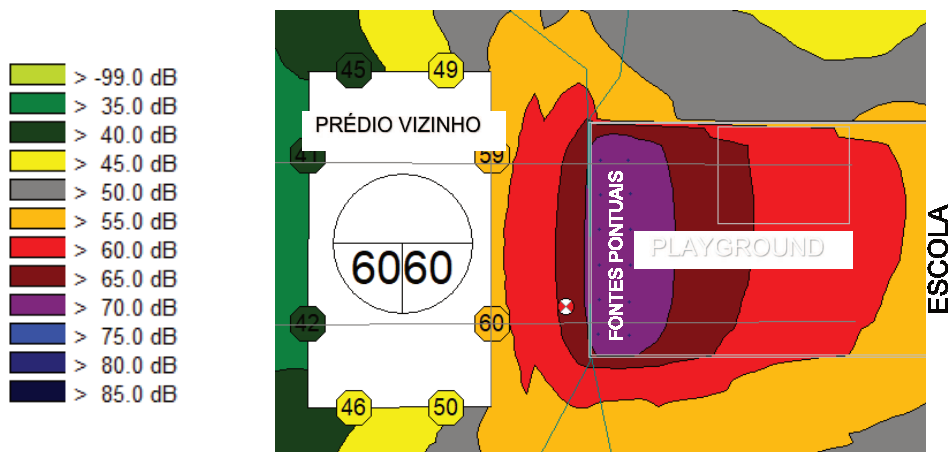


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.4.2 EMEI Unidos da Paineira

A vista superior da Figura 70 apresenta a simulação sem a barreira acústica, com o objetivo de simular a situação real, ou seja, as fontes pontuais (espaçadas de dois em dois metros em ambas direções) foram posicionadas próximas ao muro de arrimo, tal como acontece no uso diário da escola. Assim, é possível verificar a propagação sonora causada pela fonte até o receptor, que apresenta um decréscimo dos NPS de aproximadamente 15 dB se comparada com o mapa de ruído da fachada sem a barreira, apresentada na Tabela 24.

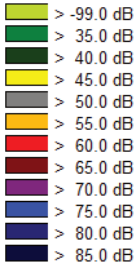
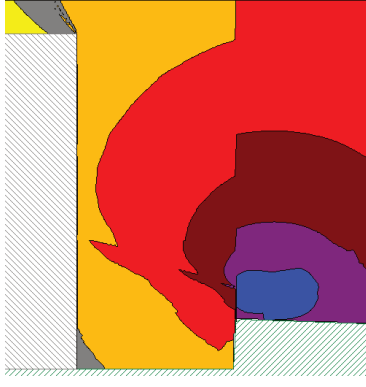
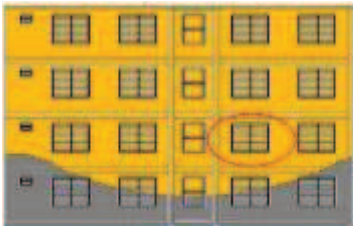
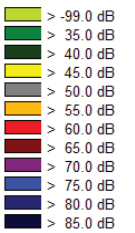
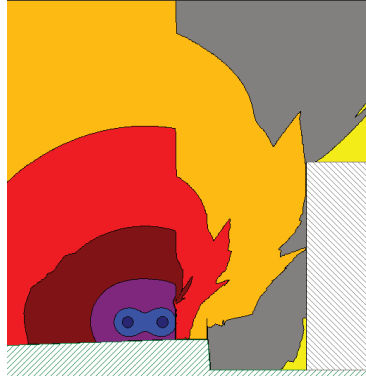

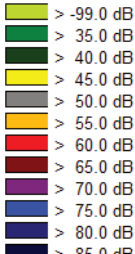
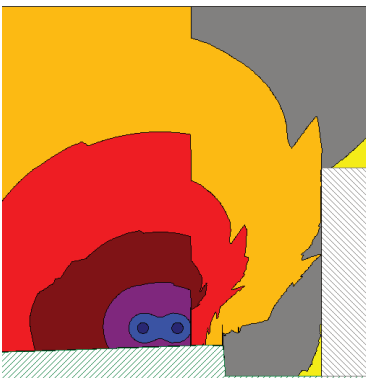

Figura 70 – Vista superior da simulação acústica da escola UP sem a barreira acústica



Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 24 apresenta um comparativo das três situações proposta de simulação, onde se observa o decréscimo de 5 dB com a inserção da barreira, e o afastamento das fontes pontuais do limite do terreno de 1,5 metros.

Tabela 24 – Comparativo entre as três situações de simulação

Estratégia	Corte	Fachada	NPS predominante
Simulação sem barreira acústica 			55 dB
Barreira com acabamento de topo 			50 dB
Barreira sem acabamento de topo 			50 dB

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor.

Dessa maneira, foi possível proceder as correções acústicas dos NPS medidos no local, e da simulação no *software* CADNAA®, objetivando ajustar os valores para realizar a comparação com os índices estabelecidos pela NBR 10151 para os ambientes externos, e a NBR 10152 para os ambientes internos. Para isso, foi realizada a correção dos valores comparando as medições de campo com a simulação. Para a escola JC, a correção foi de supressão de 1 dB dos valores

encontrados na simulação sem a barreira. Para a escola UP, a correção foi de acréscimo de 3 dB nos resultados, conforme a Tabela 25.

Tabela 25 – Cálculo do acréscimo e supressão dos valores de NPS na relação entre a medição de campo e a simulação

Escola	Medições de campo (dB)	Simulação sem barreira (dB)	Correção (dB)	Simulação com barreira (dB)	Simulação com barreira sem topo (dB)
JC	69	70	- 1	54	59
UP	58	55	+ 3	53	53

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com isso, a EMEI JC apresentou valores próximos do máximo admitido, ou seja, 54 dB para a barreira com acabamento de topo. No caso de a barreira acústica não apresentar acabamento de topo, a atenuação resultante é de 10 dB, ou seja, foi obtido uma atenuação sonora com o acréscimo do acabamento de topo de 5 dB a mais em relação a situação sem o acabamento de topo. No entanto, nas duas situações não são atingidos os valores preconizados pela norma.

A EMEI UP apresentou valores da simulação de 53 dB para as duas situações, ou seja, com e sem o acabamento de topo, evidenciando que a inserção do acabamento de topo para esta situação não foi relevante, fato este relacionado a topografia do terreno e ao pequeno comprimento de onda calculado para a frequência predominante. A Tabela 26 apresenta os valores fixados pela NBR 10152 (ABNT, 2017), e encontrados em ambas escolas.

Tabela 26 - Valores de NPS em ambas escolas, e a relação com os valores definidos pelas normas 10151, e 10152 para ambientes internos

NBR 10152 (2017) - dB	Escola	Barreira completa - dB	Barreira sem acabamento de topo-dB
35 – 40 - 45	JC	54	59
	UP	53	53

Fonte: Fonte: Elaborada pelo autor.

Nas duas escolas o afastamento de 1,50m da barreira acústica em relação ao alinhamento do terreno foram adotados. A diferença está na distância direta do

emissor para o receptor (d), que para a escola JC é de 2,33 m, e para a escola UP é de 8,24 m, sendo considerado a distância do receptor para a barreira de 0,50m nas duas situações. Esta informação foi relevante para o cálculo do número de Fresnel.

O número de Fresnel (N) calculado para cada escola apresentou um valor superior para a escola UP. Aparentemente esta escola teria a maior eficiência, tendo em vista que quanto maior o N , melhor a sua eficácia. O N para a escola JC foi 4,6 e para a UP foi 6,2. A questão relevante é que as frequências predominantes não são as mesmas, e conseqüentemente o comprimento de onda também. Soma-se a estes o fator relativo a distância entre a fonte sonora, e o receptor, que na escola UP é 3,5 vezes maior que o da escola JC. Assim, ao se comparar os resultados dos valores de N de ambas escolas, a escola UP apresenta maior eficiência.

Por conseqüência, foi possível calcular o IL, conforme apresentado anteriormente pela equação 2. Os valores obtidos para a escola JC foram de um IL de 15 dB e 5 dB para a escola UP. Os valores considerados já estão com as correções, conforme apontado anteriormente com a Tabela 27. Estes dados apontam para uma eficiência superior na escola JC em relação a redução dos níveis de pressão sonora.

Desta forma, a inserção da barreira acústica na escola JC apresenta uma redução dos níveis sonoros bastante superior a UP, sendo que a escola Unidos da Paineira apresenta uma atenuação sonora natural devido à distância da fonte sonora pontual, e o receptor. Por tanto, a barreira acústica proposta se mostrou eficiente quando próxima do receptor, como no caso da escola JC. Quando a distância é maior, a inserção da barreira sonora apresenta uma redução de sua eficácia bastante considerável, tendo em vista que parte da atenuação se dará pela distância entre a fonte, e o receptor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões relativas ao ruído ambiental estão aumentando em escala global com velocidade assustadora. Existe um número cada vez maior de pessoas com problemas de saúde relacionados aos índices elevados de ruídos nas cidades. O meio urbano, cada vez mais denso, se apresenta como o principal agente da poluição sonora em todos os setores da sociedade, desde os pequenos bairros até as zonas urbanas mais complexas, e muito se deve a ineficiência do setor público de realizar o controle, e a regulamentação destas questões, bem como do esclarecimento dos cidadãos quanto as práticas ruidosas.

Neste cenário, a construção de escolas sem uma análise prévia dos impactos que a mesma pode ocasionar em relação ao ruído pode fazer com que a deixe de funcionar como um equipamento público benéfico para um objeto de incômodo, causando estresse nos vizinhos, e culminando com a desvalorização de imóveis próximos.

Neste panorama, as barreiras acústicas são apontadas como uma das soluções mais eficazes para a redução dos níveis de pressão sonora no caminho de propagação entre o emissor, e o receptor. Este trabalho abordou esta solução, e propôs a inserção de obstáculos acústicos nas áreas de playground de duas escolas infantis municipais, partindo de situações reais e que demandam uma solução da Secretaria Municipal de Educação de Porto Alegre. Os projetos das barreiras acústicas propuseram uma integração com o playground, para que o obstáculo sonoro não fosse um anteparo que causasse estranheza as crianças. Para isso, o projeto contemplou a especificação dos pavimentos com pisos emborrachados permeáveis, e coloridos, novos brinquedos, e o uso de cores primárias, tanto nos pisos quanto nos pilares da barreira sonora, com a intenção de integração de uma solução acústica com questões formais de um espaço lúdico como o playground.

As questões relacionadas à altura, espessura, e design foram embasadas na pesquisa bibliográfica que aumentaram o repertório de projeto. Os ensaios em laboratório permitiram comprovar que o uso de material fonoabsorvente para a absorção sonora é relevante, tendo em vista que os valores resultantes foram satisfatórios. Desta maneira, foi possível constatar que as reduções dos níveis de pressão sonora foram significativas, principalmente quando existe a aproximação da barreira sonora em relação ao receptor, onde a perda por inserção (IL) na escola JC

foi bastante superior ao da escola UP, que possui uma distância 3,5 vezes maior que a escola JC, por exemplo. No entanto, mesmo eficientes, os resultados obtidos pela inserção destas barreiras não foram suficientes para atingir os valores de referências das normas, evidenciando que a solução deve ser pensada conjuntamente com alternativas para além da inserção da barreira acústica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 10152:** Níveis de ruído para conforto acústico-Procedimento. Rio de Janeiro, 1987.

_____.**NBR 10151:** Avaliação do ruído em área habitadas, visando o conforto da comunidade - Procedimento.Rio de Janeiro, 2000.

_____.**NBR 16313:** Acústica-Terminologia. Rio de Janeiro, 2014.

_____.**NBR 10152:** Acústica - Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações. Rio de Janeiro, 2017.

_____.**Ruído Aeronáutico** – Terminologia. TB 389. Rio de Janeiro, 1990. 10 p.

BERTOLI, S. R. **Avaliação do conforto acústico de prédio escolar da rede pública** : O caso de Campinas. São Paulo: ENCAC, 2001.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. Edgard Blücher, 2006.

BOLT, R.H. On the design of perforated facings for acoustic materials, **Journal of the Acoustical Society of America – J.A.S.A**, 19, p. 917-921, 1947.

BRÜEL; KJAER. **Environmental noise**. Naerum, Dinamarca, 2001.

CAMPOS, Á. C. A.; CERQUEIRA, E. A.; SATTLER, M. A. Ruídos urbanos na cidade de Feira de Santana. Sitientibus. **Anais...** . p.21–35, 2003. Feira de Santana.

CARVALHO, R. P. **Acústica arquitetônica**. 2. ed.Rev.Ampli.Brasília: THESAURUS, 2010.

CORTELLA, S. Faça o teu melhor na condição que você tem enquanto você não tem condições de fazer. Vídeo. 4min 40seg. 2016. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=BsEH-DbtDB4&feature=youtu.be>. Acesso em 15 jun 2018.

CROCKER, M.J. **Handbook of noise and vibration control**. Published by John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jerse, 2007.

CROMBIE, D.; HOTHERSALL, D.; CHANDLER-WILDE, S. Multiple-edge noise barriers. **Applied Acoustics**. Vol. 44, Nº 4, p. 353-367, 1995.

DAIGLE, G. Technical assessment of the effectiveness of noise walls – **Final Report. Noise/News International**, I-INCE Publication 99-1, p. 137-161, 1999.

EGAN, M. D. **Architectural acoustics**. J. Ross Pub., 2007.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1793-1 (Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 1: Intrinsic characteristics of sound absorption)**. 1998.

- FWHA. Federal Highway Administration. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/>>. Acesso em 21 de fev 2018.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002.
- GONÇALVES, R. P. R. **Atenuação sonora de barreiras acústicas**, 2014. Universidade de Coimbra.
- GONZÁLEZ, A. R.; CALLE, E. A. D. El ruido vehicular urbano: problemática agobiante de los países en vías de desarrollo. **Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales**, v. 35, n. 137, p. 509–530, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082011000400009&lng=en&nrm=iso&tlng=es>. Acesso em 05 nov 2017.
- HALIM, H.; ABDULLAH, R.; ABDULLAH, A.; ALI, A.; MOHD, M. J. Effectiveness of existing noise barriers : comparison between vegetation , concrete hollow block , and panel concrete. **Procedia Environmental Sciences**, v. 30, p. 217–221, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proenv.2015.10.039>>. Acesso em 12 nov 2017.
- HÁZYOVÁ, L.; ROSÃO, V.; CONCEIÇÃO, E.; LEONARDO, R. Inserção de barreiras acústicas na paisagem Portuguesa. CNAI'10. **Anais...** . p.11, 2014. Vila Real.
- HENDRIKS, R.; RYMER, B.; BUEHLER, D.; ANDREWS, J. **Technical Noise Supplement to the Caltrans Traffic Noise Analysis Protocol A Guide for the Measuring, Modeling, and Abating Highway Operation and Construction Noise Impacts 6**. California, 2013.
- HERMANN, B. M.; HADDAD, E. A. Mercado imobiliário e amenidades Urbanas: A view through the window. **Estudos Econômicos**, Vol. 35. 2005
- HORVAT, M.; JAMBROŠIĆ, K.; DOMITROVIĆ, H. The influence of top finishing of the noise barrier on its acoustic performance – field examination. EUROREGIO. **Anais...** . p.1–8, 2016. Porto.
- INDRIANTI, N.; BIRU, N. B.; WIBAWA, T. The development of compressor noise barrier in the assembly area (case study of PT Jawa Furni Lestari). **Procedia CIRP**, v. 40, p. 706–711, 2016.
- ISHIZUKA T.; FUJIWARA K. Performance of noise barriers with various edge shapes and acoustical conditions. **Applied Acoustics**, N° 65, p. 125-141, 2004.
- ITT PERFORMANCE. Instituto tecnológico de desenhos e construção civil. **Relatório de Ensaio de determinação de coeficiente de absorção sonora**, São Leopoldo, 2018.
- KNAUER, H.; PEDERSEN, S. **FHWA highway noise barrier design handbook. Final report**. Cambridge, 2006.
- KOTZEN, B.; ENGLISH, C. **Environmental noise barriers**. segunda ed. 2009.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K. **Arquitetura escolar: o projeto do ambiente de ensino**. Oficina de textos, 2011.

LACERDA, A. B. M. DE; MAGNI, C.; MORATA, T. C.; MARQUES, J. M.; ZANNIN, P. H. T. Ambiente urbano e percepção da poluição sonora. **Ambiente & sociedade**, v. VIII, n. 2, p. 1–13, 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/asoc/v8n2/28606.pdf>>. Acesso em 17 set 2017.

LARANJA, R. A. C. **Modelo heurístico modificado de barreiras acústicas para uso em áreas urbanas**, 2004. 347f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul(UFRGS), Porto Alegre, 2004.

L'ESPÉRANCE, A.; HERZOG, P.; DAIGLE, G.A.; NICOLAS, J.R. Heuristic Model for Outdoor Sound Propagation Based on an Extension of the Geometrical Ray Theory in the Case of a Linear Sound Speed Profile, **Applied Acoustics**, vol. 37, p. 111-139, 1992.

LISOT, A.; SOARES, P. F. Ressonadores de Helmholtz em barreiras acústicas: avaliação do desempenho na atenuação do ruído de tráfego. In: ACUSTICA, 2008, Coimbra. **Anais...** Coimbra: SPA, 2008. p.1–12.

LISOT, A.; SOARES, P.F.; TAMANINI, C. A. M.; COELHO, G. B. **Utilização de blocos cerâmicos ressoadores para o tratamento acústico de salas**. Acústica 2008, Coimbra, Portugal, Universidade de Coimbra.p.20-22.

LÓPEZ, R. A.; MARTÍN, R. P. **Manual de acústica ambiental y arquitectónica**. 1ª ed. Madri: Paraninfo S.A. -TXT, Espanha, 2017.

MEISSER, M. **Acustica de los Edificios**. 1ª ed. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, S.A., Espanha, 1973.

MORAIS, L. R. DE. **Estudo de Barreiras Acústicas no controle do ruído aeroportuário**, 2008. 340 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Programas de pós-graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro(UFRJ), Rio de Janeiro, 2008.

MURGEL, E. **Fundamentos de acústica ambiental**. São Paulo: Senac, 2007.

NETO, M.DE.F.F. **Estudos de barreiras acústicas ao ar livre, sob a perspectiva de eficiência e qualidade sonora**, 2002. 126f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de pós graduação em Engenharia, Universidade Estadual de Campinas(UNICAMP), Campinas, 2002.

NUNES, M. F. DE O. **Avaliação da percepção do ruído aeronáutico em escolas**. 2005. 289f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2005.

NUNES, M. F. DE O.; SATTTLER, M. A. Aircraft noise perception and annoyance at schools near Salgado Filho International Airport, Brazil. **Building Acoustics**, v. 13, n. 2, p. 159-172, 2009.

PAIXÃO, Dinara X. da. **Caracterização do isolamento acústico de uma parede de alvenaria, utilizando análise estatística de energia (SEA)**, 2002. 161p. Tese (Doutorado Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, 2002.

PAIXÃO, D.X.; SANTOS, J.L.P. Acústica da sala de aula. In: ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC, 16., 1995, São Paulo, SP. **Anais...** São Paulo: Piedade Ltda., p. 61-64, 1995.

PATRÍCIO, J. **Acústica nos edifícios**. 6. ed. Lisboa: Verlag Dashöfer, 2010.

PATRICIO, J.; PATRAQUIM, R. Avaliação experimental da absorção sonora em painéis de madeira. In: VI CONGRESSO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA- FIA, 2008, Buenos Aires. **Anais...** 2008. p. 1–10.

PAZOS, D. F. DE P. **Caracterização da reflexão sonora de barreiras acústicas com com superfícies corrugadas periódicas**, 2015.209f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, 2015.

PETROVICI, A. M.; CUETO, J. L.; GEY, R.; et al. Optimization of some alternatives to noise barriers as noise mitigation measures on major roads in europe. Case study of a highway in Spain. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 15, n. 7, p. 1617–1628, 2016.

PFRETZCHNER, J.; COLINA, C.; MARTINS, M. A; et al. **Pérdidas por inserción em barreras antiruido de bajo aislamiento acústico**. *TécniAcústica – Jornadas Nacionales de Acústica*, Valencia, 1994.

RAMOS, H. P. **Um estudo sobre a previsibilidade dos preços de imóveis de Porto Alegre- evidências do mercado de venda e de locação**, 2016.73f. Dissertação (Mestrado em Administração) - Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul(UFRGS), Porto Alegre, 2016.

RODRIGUES, A. J. DA C. **Barreiras acústicas , uma solução para controlar o ruído em meio urbano**, 2013. Universidade do Minho.

SANTOS, M.J.; SLAMA, J. G. O. O ruído no ambiente escolar: causa e consequência. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2., 1993, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis (SC), p. 301, 1993.

SERRA, M. R.; BIASONI, E. C. Influencia de los parámetros acústicos de recintos escolares en los procesos de comprensión y memorización. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 1993, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis (SC), 1993.

STANDARD, B. **Standard ISO 9613:1996. Acoustics --- Attenuation off sound during propagation outdoors: Part 2: General Method of calculation**. 1996.

STANDARD, B. **Standard ISO 11654:1997. Acoustics --- Sound Absorbers for Use in Buildings --- Rating of Sound Absorption.** 1997.

STANDARD, B. **ISO 354:2003 Acoustics — Measurement of sound absorption in a reverberation room.** 2003.

URA, A. M.; BERTOLI, S. A acústica das salas de aula das escolas da rede estadual de Campinas-SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis (SC), p. 333- 337, 1998.

VASCONCELOS, M. A. DE O. C.; NAKATA, C. M. Avaliação dos níveis de ruído em ambientes de ensino. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 6, p. 16–21. 2013.

WATTS, G.; MORGAN, P.; SURGAND M. Assessment of the diffraction efficiency of novel barrier profiles using an MLS- based approach. **Journal of Sound and Vibration 274**, p. 669-683, 2003.

WEST, M.; GILBERT, K. E.; SACK, R.A. A Tutorial on the Parabolic Equation (PE) Model Used for Long Range Sound Propagation in the Atmosphere, **Applied Acoustics**, vol. 37, p. 31- 49, 1992.

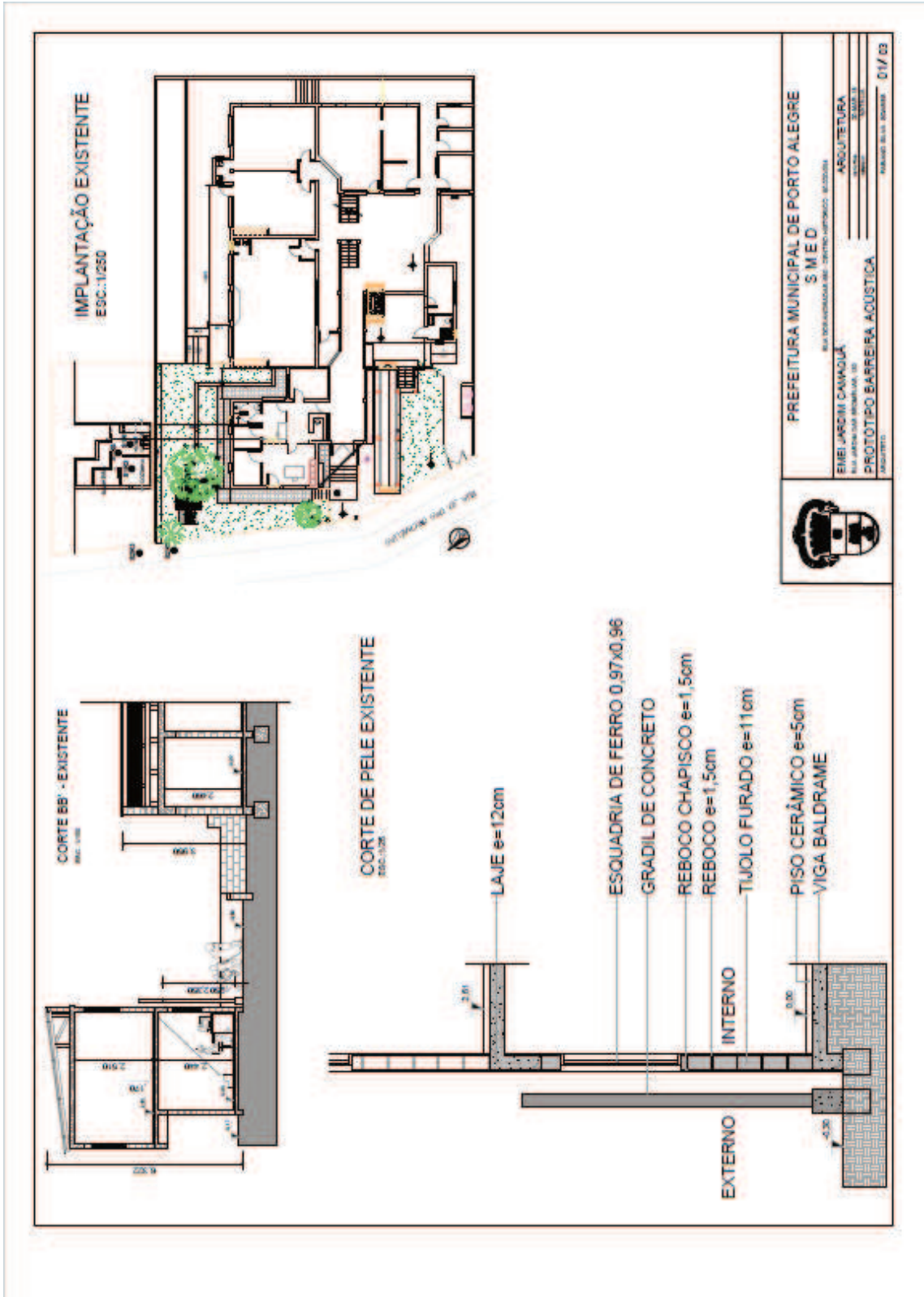
WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for community noise.** 1999.

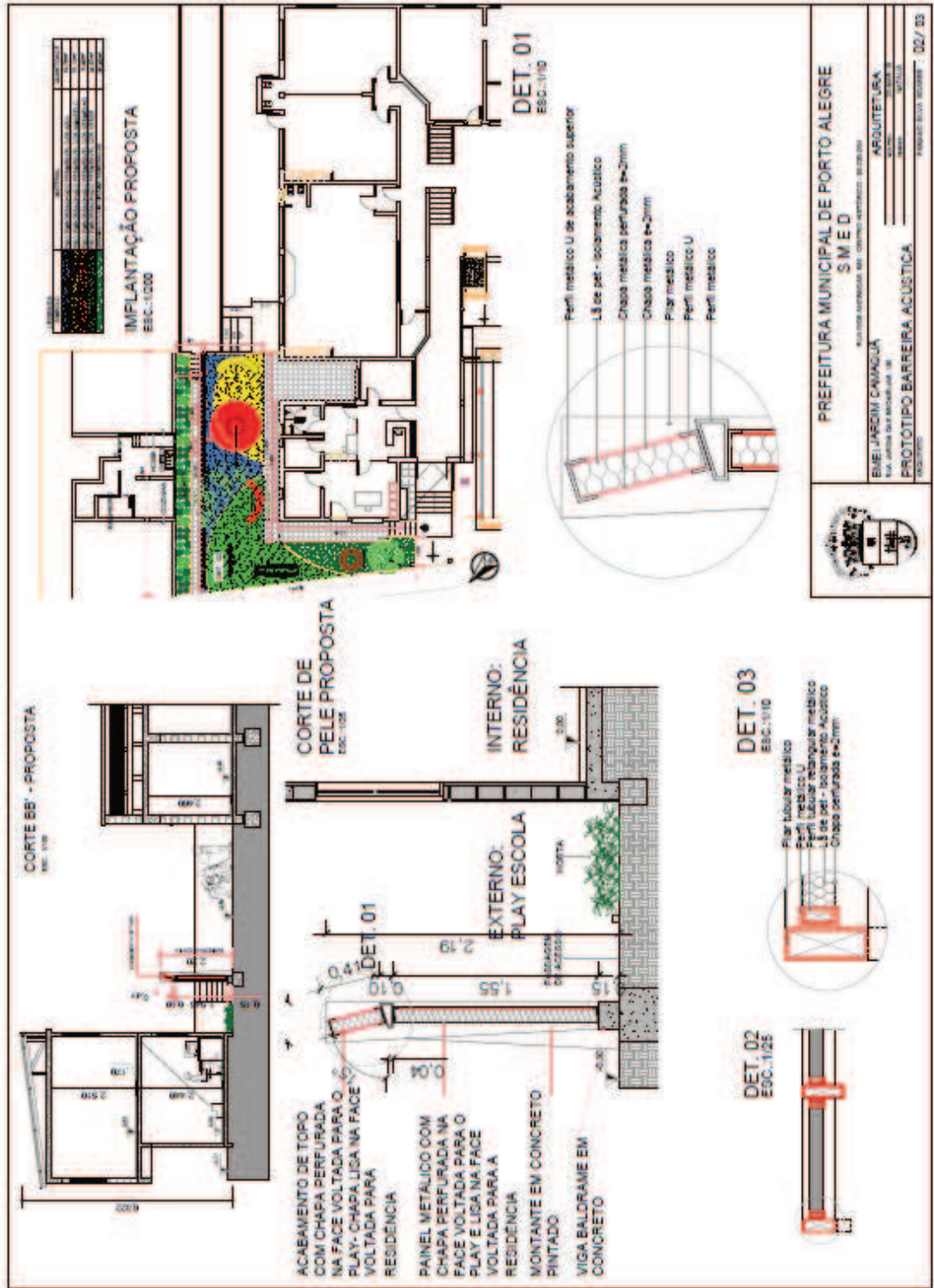
WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Burden of disease from environmental noise.** 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Résumé D'orientation Des Directives De l'oms Relatives Au Bruit Dans l'environnemental** [documentos on line] 2003. Disponível em URL: <http://www.who.int/homepage/primers>.

XAVIER, S. A. **Comportamento de barreiras acústicas em Portugal**, 2009. Universidade de Aveiro.

APÊNDICE A – PLANTA DOS PROJETOS ARQUITETÔNICOS DA EMEI JARDIM CAMAQUÃ





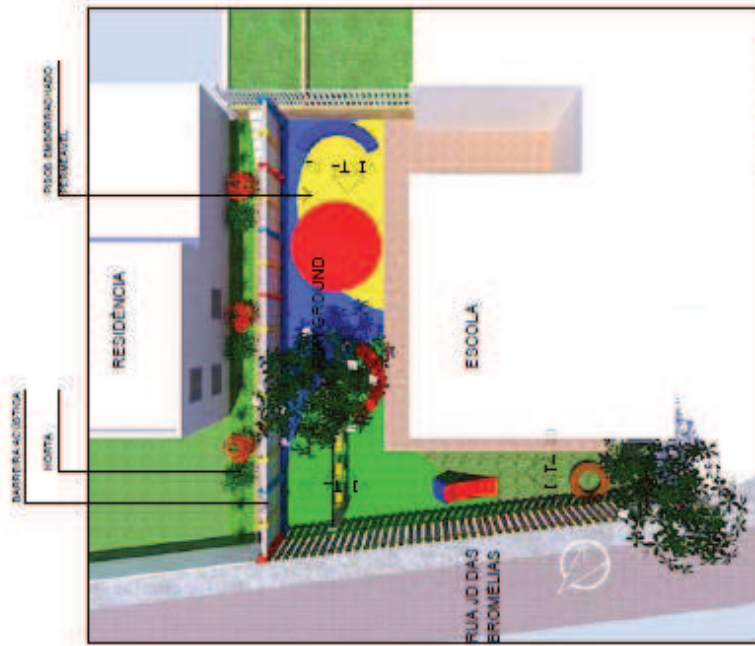
PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE
S M E D

AV. SÉRGIO BASTOS, 89 - CENTRO - PORTO ALEGRE - RS

ARQUITETURA
S M E D

PROTÓTIPO BARREIRA ACÚSTICA
S M E D

PROJETO: 02 / 03



PLANTA BAIXA



VISTA 01



VISTA 02



VISTA 03



PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE

S M E D

RUA DOS ANJOS, 500 - CENTRO HISTÓRICO - PORTO ALEGRE

EMIL JARDIM CAMARGO ARQUITETURA

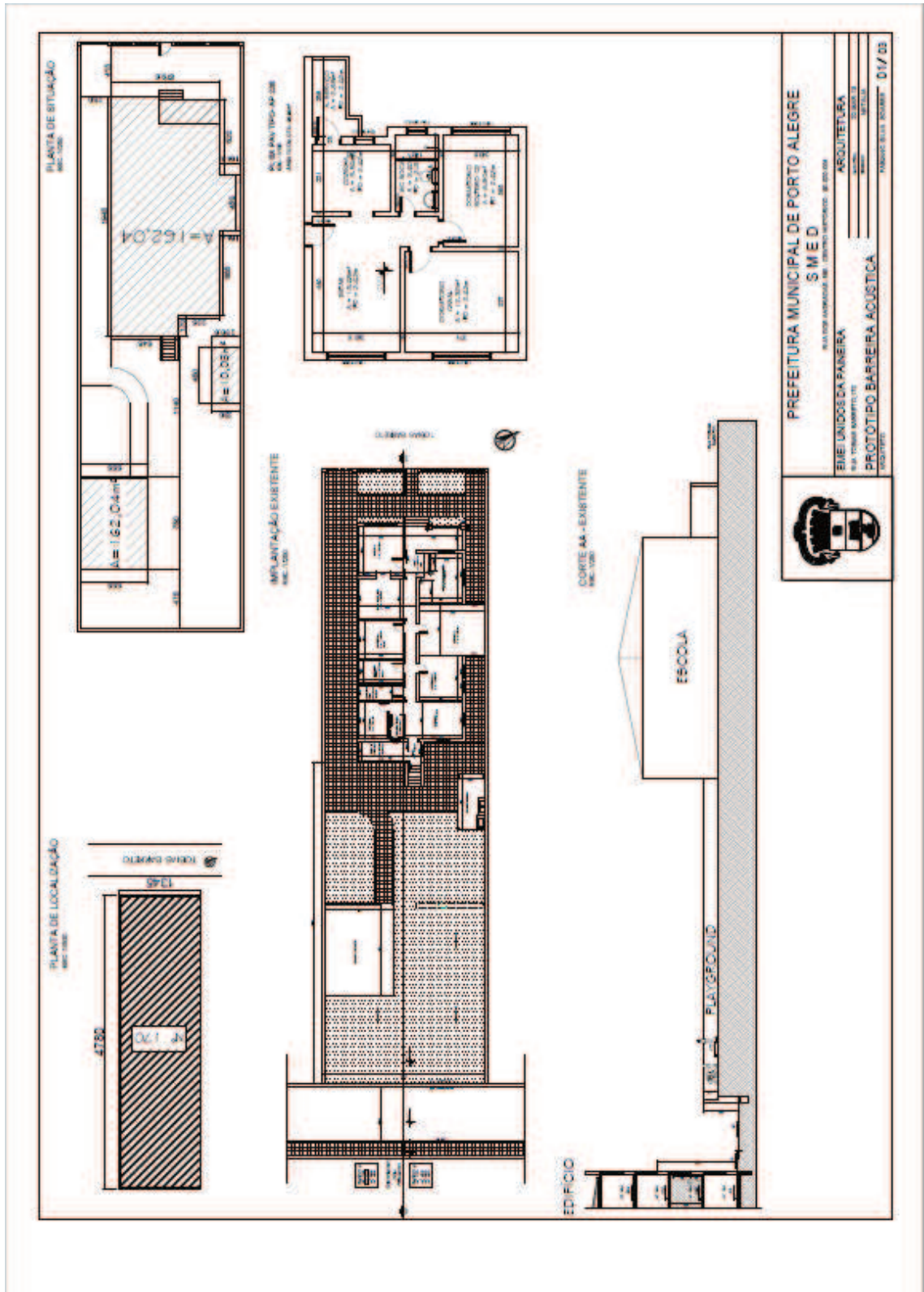
RUA JARDIM DAS BRONELIAS, 100

PROTÓTIPO BARRERA ACÚSTICA

PROJETO

03/03

APÊNDICE B – PLANTA DOS PROJETOS ARQUITETÔNICOS DA EMEI UNIDOS DA PAINEIRA



PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE	
S.M.E.D.	
RUA DOBSON, 100 - CENTRO - PORTO ALEGRE - RS 91001-000	ARQUITETURA
RUA TORRES RABELO, 110 - CENTRO - PORTO ALEGRE	PROJETO
RUA DOBSON, 100 - CENTRO - PORTO ALEGRE	PROTÓTIPO BARREIRA ACÚSTICA
VIAVETRE	VIAVETRE
	01 / 03

The drawing consists of a central site plan and three perspective views. The site plan, titled "PLANTA BAIXA", shows the layout of the school building, a playground, and an acoustic barrier. Labels include "BARRERA ACUSTICA" (Acoustic Barrier), "PILOTO DEBILITADO" (Disabled Pilot), "PILOTO DEBILITADO REINTEGRANTE" (Reintegrating Disabled Pilot), "QUADRA POLIESPORTIVA" (Poly-sports Court), "EDIFICIO VIZINHO" (Neighboring Building), "EDIFICIO ESCOLAR" (School Building), and "PLAYGROUND".

The three perspective views are labeled "VISTA 01", "VISTA 02", and "VISTA 03".

VISTA 01: Shows the school building with a yellow facade and red accents, viewed from a low angle.

VISTA 02: Shows the school building from a side angle, highlighting the playground area.

VISTA 03: Shows the school building from a different side angle, showing the playground and the acoustic barrier.



PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE
 S.M.E.D.
 Rua dos Lombos, s/n - Centro Histórico - Porto Alegre
 RUIE UNIDOS DA FAINEIRA
 Rua Tereza Nóbrega, 100 - Centro - Porto Alegre
 PROTÓTIPO BARRERA ACUSTICA
 VISTA 03

