

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

ROSEMARA SANTOS DENIZ AMARILLA

**ESTUDO DE BARREIRA ACÚSTICA NO CONTROLE DE RUÍDO EM
UM CÂMPUS UNIVERSITÁRIO**

TESE

CURITIBA

2019

ROSEMARA SANTOS DENIZ AMARILLA

**ESTUDO DE BARREIRA ACÚSTICA NO CONTROLE DE RUÍDO EM
UM CÂMPUS UNIVERSITÁRIO**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai

Coorientador: Prof. Dr. Marcio Henrique de Avelar
Gomes

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Amarilla, Rosemara Santos Deniz

Estudo de barreira acústica no controle de ruído em um câmpus universitário [recurso eletrônico] / Rosemara Santos Deniz
Amarilla.-- 2019.

1 arquivo texto (193 f.): PDF; 7,88 MB.

Modo de acesso: World Wide Web

Título extraído da tela de título (visualizado em 15 out. 2019)

Texto em português com resumo em inglês

Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2019.

Bibliografia: p. 177-183

1. Engenharia civil - Teses. 2. Poluição sonora. 3. Engenharia acústica. 4. Blocos de concreto. 5. Controle de ruído. I. Catai, Rodrigo Eduardo, orient. II. Gomes, Marcio Henrique de Avelar, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, inst. IV. Título.

CDD: Ed. 22 -- 624

Biblioteca Ecoville da UTFPR, Câmpus Curitiba

Bibliotecária: Lucia Ferreira Littiere - CRB 9/1271

Aluna de Biblioteconomia: Josiane Cristina de Oliveira Manguiera



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação

TERMO DE APROVAÇÃO DE TESE Nº005

A Tese de Doutorado intitulada: ESTUDO DE BARREIRA ACÚSTICA NO CONTROLE DE RUÍDO DE UM CÂMPUS UNIVERSITÁRIO, defendida em sessão pública pela candidata **Rosemara Santos Deniz Amarilla**, no dia 30 agosto de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil, área de concentração Construção Civil, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Rodrigo Eduardo Catai – Presidente – UTFPR

Prof. Dr. Cezar Augusto Romano – UTFPR

Prof. Dr. Alexandre Augusto Pescador Sardá – UFPR

Prof. Dr. Adalberto Matoski – UTFPR

Prof. Dr. Vítor Litwinczik – Anima Acústica

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 30 agosto de 2019.

A Deus o protetor de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Rodrigo Eduardo Catai, por ter orientado este trabalho de forma segura, firme e de muito bom senso.

Ao Professor Dr. Marcio Avelar, pelo incentivo, dedicação e diretrizes dadas, sem as quais o presente trabalho não seria possível.

Aos Professores Dr. Cezar Augusto Romano e Dr. Alfredo Iarozinski Neto, são dois Professores incríveis que conspiram para fazer o meu estudo muito melhor. O empenho e a inteligência de vocês sempre me cativam.

A minha família, em especial a minha mãe, por entenderem a minha ausência todos esses anos e continuarem a me amar mesmo assim.

Aos colegas da UTFPR pelas trocas de experiências, ideias e momentos de descontração, em especial, Juliana Biasi, Nathalie Cavalcanti, Rodrigo Ribeiro, Raylton Sousa, Luis Henrique, Fernanda Henneberg e Paulo Sabino.

Ao Professor Nilson Barbieri, por disponibilizar os tubos de impedância da PUCPR, e ao Pesquisador Fernando Jun Hattori Terashima, por realizar as medições acústicas.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo apoio financeiro.

E, finalmente, ao meu esposo, Miguel, que nunca hesita em me dizer “não” quando mais preciso. Meu muito obrigado pelo incentivo e pelo seu *feedback* constante durante o processo de elaboração desta pesquisa.

RESUMO

AMARILLA, Rosemara Santos Deniz. **Estudo de barreira acústica no controle de ruído em um campus universitário**. 2019. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

A urbanização é uma das principais tendências globais do século XXI, tornando-se um grande desafio à avaliação e gestão do ruído ambiental, pois há uma preocupação com a redução da poluição sonora nas cidades e em suas edificações, em virtude do bem-estar e da saúde da população. Com base neste contexto, a presente tese tem como objetivo geral estudar barreira acústica simples de blocos de concreto, por meio de simulação computacional. Para tanto, inseriu-se na biblioteca do *software SoundPlan* um novo coeficiente de absorção sonora que caracteriza blocos de concreto de resíduos da construção e demolição (RCD), representando uma solução sustentável para os problemas de resíduos e para o controle de ruído de tráfego em um campus universitário na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. A pesquisa apresenta um benefício ambiental duplo, por um lado, a redução do impacto dos níveis de poluição sonora e, por outro lado, a reciclagem de subproduto da construção e demolição (RCD), material utilizado na simulação da barreira acústica. Neste estudo utilizou-se a técnica de pesquisa de campo, estudo exploratório e experimental. Os dados do impacto sonoro que atinge a área acadêmica foram levantados *in loco* e calculados no *software* de predição, constatando que os níveis sonoros estavam acima do limite recomendado pela norma NBR 10151:2000 e pela legislação municipal nº. 10625:2002, principalmente, os pontos receptores próximos às vias de tráfego de veículos. Por conseguinte, os resultados das simulações, após a inserção da barreira acústica, apresentaram uma atenuação do ruído em média de 12 dB em torno do campus. Conclui-se que além de atenuação sonora, os blocos produzidos com RCD, tornam-se uma prática para sustentabilidade.

Palavras-chave: Poluição sonora. Mapa de ruído. Barreira acústica simples. Blocos de concreto.

ABSTRACT

AMARILLA, Rosemara Santos Deniz. **Acoustic barrier study in noise control at a university campus**. 2019. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Federal Technology University – Parana. Curitiba, 2019.

Urbanization is one of the major global trends of the 21st century, becoming a great challenge to evaluate and manage environmental noise, because there is a concern with the reduction of noise pollution in cities and their buildings, due to the well-being and health of the population. Based on this context, the present thesis aims to study simple acoustic barrier of concrete blocks by means of computational simulation. Therefore, a new sound absorption coefficient was introduced in the SoundPlan software library which characterizes concrete blocks of construction and demolition waste (CDW), representing a sustainable solution for waste problems and for the control of traffic noise in a university campus in the city of Curitiba, Paraná, Brazil. The research has a dual environmental benefit, on the one hand, reducing the impact of noise pollution levels and, on the other hand, recycling by-product of construction and demolition (CDW), material used in the simulation of the acoustic barrier. In this study used the field research technique, exploratory and experimental study. The data of the sound impact that reaches the academic area were collected in loco and calculated in the software of prediction, noting that the sound levels were above the limit recommended by NBR 10151: 2000 and by Municipal Law nº. 10625: 2002, mainly, the receiving points close to the vehicular traffic lanes. Consequently, the results of the simulations, after insertion of the acoustic barrier, showed an average noise attenuation of 12 dB around the Campus. Concludes that besides sound attenuation, the blocks produced with RCD become a practice for sustainability.

Keywords: Sound pollution. Noise map. Simple acoustic barrier. Concrete blocks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pressão sonora (μPa) e nível de pressão sonora (dB).	31
Figura 2 – Curvas padronizadas de ponderação de frequência.	34
Figura 3 – Propagação sonora: (a) espalhamento esférica do som; (b) modelo de raio.	37
Figura 4 – Condições significativas de atenuação sonora ao ar livre.	38
Figura 5 – Gradientes de temperatura e trajetórias dos raios sonoros a partir da fonte. a) Efeito de um gradiente negativo de temperatura. b) Efeito de um gradiente positivo de temperatura.	39
Figura 6 – Influência do vento na trajetória dos raios sonoros a partir da fonte.	40
Figura 7 – Efeitos da refração na trajetória dos raios sonoros, com e sem barreira acústica. Quadros superiores: vento com barreira acústica (linha sólida) e sem (linha tracejada). Quadros inferiores: temperatura com e sem barreira acústica.	40
Figura 8 – Área de audição dos seres humanos.	42
Figura 9 – Efeitos de atenuação relacionados a barreiras acústicas, representados pelos caminhos da onda sonora difratada, transmitida e refletida e pela dissipação de energia absorvida pela barreira.	52
Figura 10 – Geometria simplificada de uma barreira mostrando a difração sonora.	52
Figura 11 – Barreira mais próxima à fonte sonora.	53
Figura 12 – Barreira mais próxima ao receptor.	54
Figura 13 – Principais raios sonoros que podem ser contidos por uma barreira.	54
Figura 14 – Comportamento de uma barreira acústica.	55
Figura 15 – Barreira acústica com material absorvente de ruído.	57
Figura 16 – Modelo de fonte imagem para o som refletido (fonte imagem e fonte real).	58
Figura 17 – Reflexão sonora em barreiras acústicas.	59
Figura 18 – Formas de minimizar os efeitos de reflexões sonoras em barreiras acústicas: (a) afastamento de barreiras paralelas, (b) aumento da altura de barreiras paralelas, (c) aplicação de material absorvedor nas superfícies e (d) barreiras com geometrias especiais (inclinadas, curvadas ou corrugadas).	60
Figura 19 – Barreira acústica sem inclinação nas extremidades com ângulo de visão de 160°	60
Figura 20 – Comprimento da barreira acústica reduzido pelas inclinações das extremidades.	61
Figura 21 – Diferença de comprimento de caminho para uma barreira acústica simples.	62
Figura 22 – Modelo de seções de barreira acústica em Copenhague, Dinamarca.	63
Figura 23 – Modelo de barreira acústica em Copenhague, Dinamarca.	64
Figura 24 – Barreira acústica instalada em Copenhague, Dinamarca.	64
Figura 25 - Barreira central combinada com barreiras laterais em Hardinxveld, Holanda.	65
Figura 26 – Barreira de blocos de concreto, estilo vernacular do Oriente Médio.	65
Figura 27 – Barreira de concreto. Perfis na horizontal (lado esquerdo) e vertical (lado direito).	66
Figura 28 – Caminho que a onda sonora percorre até a barreira acústica.	69
Figura 29 – Princípio do método triângulo de busca.	71
Figura 30 – Método de cálculo. A) Planta baixa do modelo. B) Modelo na vertical.	71
Figura 31 – Configurações para cálculo de ruído.	72
Figura 32 – Efeito principal dos fatores A e B.	74
Figura 33 – Efeito de interação entre os fatores. a) Quando não há interação. b) Há interação entre os fatores A e B.	74
Figura 34 – Produção científica disponibilizada pela plataforma <i>Scopus Search</i> de 1990 a 2019.	75
Figura 35 – Espectros de ruído de tráfego rodoviário típicos a velocidades de 80 km/hora.	85

Figura 36 – Bonde próximo ao protótipo da barreira acústica.	86
Figura 37 – Síntese dos procedimentos adotados para desenvolver a pesquisa.	91
Figura 38 – Localização do câmpus universitário. SE-NC Setor Especial Nova Curitiba. ZT-NC Zona de Transição Nova Curitiba.	93
Figura 39 – Câmpus universitário de Curitiba.	93
Figura 40 – <i>Layout</i> da área de estudo, câmpus universitário.	95
Figura 41 – Sonômetros utilizados para obter dados de níveis sonoros. Lado esquerdo: analisador modelo B&K 2250 <i>Light</i> , classe 1. Lado direito: analisador modelo DEC-5010, classe 2.	97
Figura 42 – Comparação de valores obtidos com os sonômetros Classe 1 e Classe 2.	98
Figura 43 – Sonômetros afastados 2 metros da parede e com altura de 1,20 metro do solo.	98
Figura 44 – Modelo digital do terreno da área universitária.	102
Figura 45 – Barreira acústica de um cenário real. A) Barreira acústica de bloco de concreto. B) Muro de alvenaria na fronteira com a barreira acústica.	104
Figura 46 – Análise de desempenho de barreira acústica. A) Barreira acústica, face exposta à fonte de ruído (via de tráfego). B) Muro de alvenaria, face oposta à geração de ruído (lado voltado ao receptor).	105
Figura 47 – Marcação dos pontos receptores próximos à barreira para medição do nível sonoro.	106
Figura 48 – Modelagem de barreira acústica de um cenário real.	107
Figura 49 – Materiais reciclados utilizados na composição dos blocos de concreto. A) Pedrisco como agregado graúdo; B) Areia como agregado miúdo.	110
Figura 50 – Representação esquemática do tubo de impedância.	112
Figura 51 – Tubo de impedância da Universidade PUCPR.	114
Figura 52 – Posição dos microfones nos tubos de impedância. a) Tubo de impedância de Ø28 mm. b) Tubo de impedância de Ø100 mm.	114
Figura 53 – Preparo das amostras de RCD para ensaio de absorção sonora no laboratório da PUCPR.	115
Figura 54 – Preparo das amostras de RCD para ensaio de absorção sonora no laboratório da PUCPR. A) Extração das amostras com serra copo. B) Amostras com Ø100 mm x 17 mm. C) Medição do coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância de baixa frequência.	115
Figura 55 – Nível sonoro equivalente, L_{Aeq} , em dB, dos pontos P1 a P3, bloco A e I.	118
Figura 56 – Nível sonoro equivalente, L_{Aeq} , dB dos pontos P4 a P13, bloco B, C, E e F.	119
Figura 57 – Nível sonoro equivalente, L_{Aeq} , dB dos pontos P14 a P22, bloco K, L, M e N. .	120
Figura 58 – Análise dos níveis de pressão sonora equivalente, L_{Aeq} , (dB) dos 22 pontos avaliados no câmpus universitário.	120
Figura 59 – Registros sonoros em L_{Amax} e L_{Amin} , em cada ponto receptor.	122
Figura 60 – Níveis estatísticos L_{10} e L_{90} dos 22 pontos de medições.	123
Figura 61 – Modelagem tridimensional da área em estudo, câmpus universitário.	126
Figura 62 – Mapa acústico atual do câmpus, simulado sem barreira acústica.	128
Figura 63 – Corte transversal AA, blocos A, B e C, câmpus universitário.	129
Figura 64 – Corte transversal BB, blocos L, M e N, câmpus universitário.	130
Figura 65 – Corte transversal CC, blocos A e K, câmpus universitário.	130
Figura 66 – Comparação dos níveis sonoros medidos <i>in loco versus</i> simulados.	132
Figura 67 – Alinhamento dos sonômetros para medições simultâneas do ruído.	133
Figura 68 – Avaliação de barreira acústica ao ar livre, dados do cenário real.	134
Figura 69 – Mapa de ruído com a inserção da barreira acústica conforme situação real.	136
Figura 70 – Corte AA, avaliação de atenuação sonora de uma barreira acústica em cenário real.	136
Figura 71 – Simulação da barreira acústica de acordo com o cenário real.	137

Figura 72 – Comparação entre os valores medidos e valores calculados/simulados.	138
Figura 73 – Localização da barreira acústica em torno do câmpus universitário.....	141
Figura 74 – Modelagem computacional da barreira acústica em torno do câmpus universitário.	142
Figura 75 – Cenário acústico atual do câmpus universitário, simulação de barreira com 2 m de altura.	144
Figura 76 – Corte AA, com inserção da barreira acústica de 2 m de altura.	145
Figura 77 - Corte BB, com inserção da barreira acústica de 2 m de altura.	145
Figura 78 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira, configurada a 2 m de altura.	146
Figura 79 – Cenário acústico atual do câmpus universitário, simulação com barreira de 3 m de altura.	147
Figura 80 – Corte AA com inserção da barreira acústica de 3 m de altura.	147
Figura 81 – Corte BB com inserção da barreira acústica de 3 m de altura.	148
Figura 82 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira, configurada a 3 m de altura.	149
Figura 83 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira acústica.....	150
Figura 84 – Resultado entre as médias dos fatores. A) Efeito principal. B) Interação.....	153
Figura 85 – Blocos de concreto de RCD produzidos no laboratório de materiais da UTFPR.	156
Figura 86 – Blocos de RCD e convencional. A) Blocos de concreto de RCD produzidos no laboratório da UTFPR. B) Blocos de concreto convencional (comercial).	156
Figura 87 – Preparo das amostras para ensaio de absorção sonora. A) Montagem do bloco na furadeira de bancada. B) Extração da amostra com a serra copo.	157
Figura 88 – Preparo das amostras para ensaio de absorção sonora. A) Amostras cortadas em disco de corte. B) Amostras com Ø59 mm x 17 mm.	157
Figura 89 – Amostras cortadas em disco de corte.	158
Figura 90 – Preparo das amostras para obter a massa específica. A) Pesagem das amostras.	159
Figura 91 – Resultado do coeficiente de redução sonora (NRC) da amostra de RCD.	161
Figura 92 – Coeficiente de absorção sonora das amostras convencionais em bandas de oitava.	163
Figura 93 – Comparação do NRC entre o bloco de concreto convencional e o de RCD.	164
Figura 94 – Propriedades inseridas na base de dados do <i>SoundPlan</i> para simulação de barreira acústica de blocos de concreto de RCD.	165
Figura 95 – Propriedades da base de dados do <i>SoundPlan</i> para simulação de barreira acústica de concreto convencional.	166
Figura 96 – Mapa acústico do câmpus universitário. A) Mapa acústico sem barreira. B) Mapa acústico com barreira de bloco de concreto de RCD.	169
Figura 97 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD frente ao câmpus universitário.	170
Figura 98 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD na lateral do câmpus universitário.	170
Figura 99 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD das laterais do câmpus universitário.	171
Figura 100 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD frente ao câmpus universitário.	171
Figura 101 – Detalhe da barreira acústica próximo à parada de ônibus.	172
Figura 102 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de RCD.	191
Figura 103 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de concreto Convencional.	192

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quantidade de RCD coletado no Brasil, comparação entre o ano de 2015 e 2016.	27
Quadro 2 – Níveis de pressão sonora máximos, conforme a Lei Municipal de Curitiba n°. 10625:2002.	46
Quadro 3 – Estudos relacionados ao tema desta pesquisa.	88
Quadro 4 – Nível de critério de avaliação para ambientes externos.	92
Quadro 5 – Diferenças entre os valores obtidos com os sonômetros Classe 1 e Classe 2.	97
Quadro 6 – Matriz experimental.	109
Quadro 7 – Registros sonoros referentes aos níveis L_{Amax} e L_{Amin} comparados aos níveis L_{Aeq}	121
Quadro 8 – Níveis sonoros L_{A10} e L_{A90} que ocorreram durante um intervalo de medição em cada ponto receptor no câmpus universitário.	123
Quadro 9 – Contagem volumétrica de tráfego de veículos próximo ao câmpus universitário.	124
Quadro 10 – Avaliação de barreira acústica ao ar livre, dados do cenário real.	133
Quadro 11 – Simulação da barreira acústica de acordo com o cenário real.	137
Quadro 12 – Comparação entre os valores medidos em campo e valores calculados/simulados.	138
Quadro 13 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira acústica de 2 m de altura em torno do câmpus universitário.	145
Quadro 14 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira acústica de 3 m de altura em torno da universidade.	148
Quadro 15 – Resumo dos resultados calculados em cada cenário com e sem barreira acústica.	150
Quadro 16 – Planejamento fatorial: C5 fator coeficiente de absorção sonora; C6 fator altura da barreira; C7 resposta de atenuação sonora da simulação no SoundPlan.	151
Quadro 17 – Características de cada amostra para ensaio de coeficiente de absorção sonora.	160
Quadro 18 – Resultado do coeficiente de absorção sonora (α) das amostras de RCD.	161
Quadro 19 – Resultado do coeficiente de redução sonora (NRC) da amostra do bloco convencional.	162
Quadro 20 – Desempenho sonoro da barreira acústica de bloco de concreto de RCD.	167
Quadro 21 – Comparação de atenuação sonora: Blocos de concreto de RCD versus convencional.	168
Quadro 22 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de RCD.	191
Quadro 23 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de concreto Convencional.	192
Quadro 24 – Características das amostras do bloco de concreto convencional para ensaio acústico.	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB.....	45
Tabela 2 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente.....	47
Tabela 3 – Coeficientes de absorção sonora de bloco de concreto não pintado publicados na literatura.....	57
Tabela 4 – Parâmetros de entrada definidos pelo método alemão RLS:1990 para simulação de barreira.....	70
Tabela 5 – Codificação para matriz de um planejamento fatorial.....	73
Tabela 6 – Correção para diferentes tipos de pavimentação das rodovias.....	80
Tabela 7 – Configurações iniciais do programa.....	101
Tabela 8 – Propriedades do agregado graúdo: pedrisco.....	111
Tabela 9 – Propriedades do agregado miúdo: areia.....	111
Tabela 10 – Traços realizados para a produção dos blocos.....	111
Tabela 11 – Dimensionamento do tubo de impedância.....	113
Tabela 12 – Comparação dos níveis sonoros medidos <i>in loco versus</i> simulados.....	131
Tabela 13 – Distâncias perpendiculares entre receptor/via e receptor/barreira acústica simulada.....	143
Tabela 14 – Análise da variância dos efeitos principais e da interação entre os fatores. Coef: Determina a inclinação do efeito procurado (magnitude do efeito); SE Coef: Erro padrão; DF: Grau de liberdade; Adj SS: Soma dos quadrados; Adj MS: média dos quadrados dos erros (variância do erro); Valores T, F e P: Testes estatísticos.....	153
Tabela 15 – Comparação dos coeficientes de NRC (<i>Noise Reduction Coefficient</i>).....	164
Tabela 16 – Mapeamento de ruído ambiental em torno do câmpus universitário.....	185
Tabela 17 – Resultado da simulação das barreiras acústicas de 2 e 4 metros de altura.....	189
Tabela 18 – Resultado de atenuação sonora da barreira com 2 metros de altura.....	189
Tabela 19 – Resultado de atenuação sonora da barreira com 4 metros de altura.....	189

LISTA DE SIGLAS/SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
dB	Decibel
EC	Comissão Europeia
f	Frequência
Hz	Hertz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Kg	Quilograma
L_D	<i>Day Level</i>
L_{DN}	<i>Day Night Level</i>
L_{Aeq}	Nível Sonoro Equivalente Ponderado no filtro A
m	Metro
m^2	Metro quadrado
N	Número de <i>Fresnel</i>
NCA	Nível de critério de ação
NPS	Nível de Pressão Sonora
NRC	<i>Noise Reduction Coefficient</i>
NR	Norma Regulamentadora
OMS	Organização Mundial da Saúde
Pa	Pascal
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
μPa	<i>Micro Pascal</i>
T	Temperatura WHO
V	Velocidade do som
ZR	Zona Residencial
WHO	<i>World Health Organization</i>
δ	Diferença dos trajetos por cima da barreira e através da barreira
λ	Comprimento de onda sonora
α	Coefficiente de absorção sonora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	CONTEXTO DO PROBLEMA	21
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	23
1.3	OBJETIVOS.....	23
1.3.1	<i>Objetivo Geral</i>	23
1.3.2	<i>Objetivos Específicos</i>	23
1.4	JUSTIFICATIVAS.....	24
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	27
2	ESTADO DA ARTE.....	29
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.2	CARACTERÍSTICAS DE RUÍDO	29
2.3	NÍVEL DE PRESSÃO SONORA	30
2.4	MEDIDOR DE NÍVEL DE RUÍDO AMBIENTAL.....	32
2.4.1	<i>Filtros Ponderadores</i>	33
2.5	PRINCIPAIS DESCRITORES PARA AVALIAR RUÍDO AMBIENTAL.....	34
2.5.1	<i>Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente (L_{eq})</i>	34
2.5.2	<i>Níveis Estatísticos (L_{10}, L_{50}, L_{90})</i>	35
2.5.3	<i>Nível Dia e Noite (L_{dn})</i>	36
2.6	RUÍDO AMBIENTAL: PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE	37
2.6.1	<i>Gradientes de Temperatura</i>	39
2.6.2	<i>Gradientes de Velocidade do Vento</i>	39
2.6.3	<i>Efeitos da Refração</i>	40
2.7	O RUÍDO E SEUS EFEITOS NOCIVOS À SAÚDE HUMANA	41
2.8	NORMAS E LEGISLAÇÕES REFERENTES AO RUÍDO AMBIENTAL NO BRASIL	43
2.8.1	<i>Resolução do Conselho Nacional e do Meio Ambiente (CONAMA)</i>	44
2.8.2	<i>Norma ABNT NBR 10151:2000</i>	45
2.8.3	<i>Lei Municipal de Curitiba 10625:2002</i>	45
2.8.4	<i>Norma Regulamentadora nº. 15</i>	47
2.9	CONTROLE DE RUÍDO AMBIENTAL.....	48
2.10	MAPA DE RUÍDO AMBIENTAL: FERRAMENTA DE GESTÃO URBANA	49
2.11	BARREIRA ACÚSTICA	51
2.11.1	<i>Difração sonora</i>	52
2.11.2	<i>Transmissão sonora</i>	54
2.11.3	<i>Absorção sonora do material</i>	55

2.11.4	<i>Dados de absorção sonora do bloco de concreto convencional</i>	57
2.11.5	<i>Reflexão sonora</i>	58
2.12	COMPRIMENTO DA BARREIRA ACÚSTICA	60
2.13	MODELOS DE BARREIRAS ACÚSTICAS	63
2.14	PREDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL: SOFTWARE SOUNDPLAN.....	66
2.15	SIMULAÇÃO DE PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE.....	67
2.16	PRINCÍPIOS DE CÁLCULO.....	67
2.16.1	<i>Absorção do Ar</i>	68
2.16.2	<i>Efeito do Solo</i>	68
2.16.3	<i>Reflexão Sonora</i>	69
2.16.4	<i>Barreiras: Princípios de Cálculo</i>	69
2.16.5	<i>O método de Pesquisa por Ângulo</i>	70
2.17	EXPERIMENTO FATORIAL	72
2.17.1	<i>Cálculos dos Efeitos e da Interação entre os Fatores</i>	73
2.18	ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA DA PESQUISA	75
2.18.1	<i>Mapas de Ruído Ambiental</i>	76
2.18.2	<i>Barreiras Acústicas</i>	82
3	METODOLOGIA	89
3.1	CLASSIFICAÇÃO DA PEQUISA.....	89
3.2	PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA DESENVOLVER A PESQUISA.....	90
3.3	PRIMEIRA ETAPA: MAPEAMENTO DE NÍVEL SONORO SEM BARREIRA ACÚSTICA	92
3.3.1	<i>Primeira Área de Estudo: Câmpus Universitário</i>	92
3.3.2	<i>Elaboração das Geometrias das Áreas de Estudo</i>	94
3.3.3	<i>Métodos de Mapeamento de Ruído</i>	96
3.3.4	<i>Definição dos Equipamentos de Medição de Nível Sonoro</i>	96
3.3.5	<i>Técnicas Aplicadas para Realizar o Mapeamento Sonoro in oco</i>	98
3.3.6	<i>Registrar as Características das Vias de Tráfego de Veículos</i>	99
3.3.7	<i>Registrar Fluxo de Veículos</i>	99
3.3.8	<i>Dados Meteorológicos</i>	99
3.4	SEGUNDA ETAPA: ELABORAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL SEM BARREIRA ACÚSTICA	100
3.4.1	<i>Modelagem Computacional das Áreas de Estudo</i>	100
3.4.2	<i>Parâmetro de Entrada para Elaborar o Modelo Digital do Terreno</i>	101
3.4.3	<i>Elaboração do Mapa Acústico: Representação Gráfica do Ruído de Ambiente Externo</i>	102
3.4.4	<i>Validação do Modelo Computacional: Mapa acústico</i>	103

3.5	TERCEIRA ETAPA: MAPEAMENTO DE NÍVEL SONORO COM BARREIRA ACÚSTICA	103
3.5.1	<i>Avaliação de Atenuação Sonora de uma Barreira Acústica em um Cenário Real..</i>	103
3.5.2	<i>Elaboração do Modelo Computacional do Cenário Real com Barreira Acústica...</i>	106
3.6	QUARTA ETAPA: SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA PARA O CÂMPUS UNIVERSITÁRIO	107
3.6.1	<i>Análise dos Dados Obtidos</i>	108
3.7	QUINTA ETAPA: EXPERIMENTO FATORIAL	108
3.8	SEXTA ETAPA: PROPOSTA DE BARREIRA ACÚSTICA DE BLOCO DE RCD – MODELO COMPUTACIONAL	110
3.8.1	<i>Características dos Agregados Reciclados de RCD</i>	110
3.8.2	<i>Traços Utilizados para a Produção dos Blocos de RCD</i>	111
3.8.3	<i>Ensaio Acústico das Amostras de Concreto de RCD</i>	112
3.8.4	<i>Ensaio Acústico: Laboratório de Acústica da UTFPR</i>	112
3.8.5	<i>Equipamentos e Programas Computacionais para o Ensaio Acústico na UTFPR</i>	113
3.8.6	<i>Ensaio Acústico: Laboratório de Acústica da PUCPR</i>	113
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	117
4.1	ESTUDO DE CAMPO 1: MAPEAMENTO SONORO EM UM CÂMPUS UNIVERSITÁRIO	117
4.1.1	<i>Grandezas Acústicas L_{Aeq}: Câmpus Universitário</i>	118
4.1.2	<i>Grandezas acústicas L_{Amax} e L_{Amin}: Câmpus Universitário</i>	121
4.1.3	<i>Grandezas Sonoras L_{10} e L_{90} (Níveis Estatísticos)</i>	122
4.1.4	<i>Caracterização de Tráfego Veicular Próximo ao Câmpus Universitário</i>	124
4.2	MAPA DE RUÍDO DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO.....	124
4.2.1	<i>Modelagem Computacional Tridimensional do Câmpus Universitário</i>	125
4.2.2	<i>Mapa de Ruído no Plano Horizontal: Validação do Modelo Computacional do Câmpus</i>	126
4.2.3	<i>Mapa de Ruído Vertical (Grid Noise Cross Section Map) do Câmpus Universitário</i>	129
4.3	COMPARAÇÃO ENTRE NÍVEIS SONOROS MEDIDOS E SIMULADOS DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO	130
4.4	ESTUDO DE CAMPO 2: AVALIAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA AO AR LIVRE – ÁREA RESIDENCIAL.....	132
4.5	SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE BARREIRA ACÚSTICA AVALIADA <i>IN LOCO</i>	134
4.6	COMPARAÇÃO ENTRE NÍVEIS SONOROS MEDIDOS E CALCULADOS	137
4.7	SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO	140

4.8	MAPA RUÍDO COM A INSERÇÃO DA BARREIRA ACÚSTICA NO MODELO COMPUTACIONAL.....	143
4.8.1	<i>Simulação da Barreira Acústica com Dois Metros de Altura.....</i>	<i>144</i>
4.9	SIMULAÇÃO DA BARREIRA ACÚSTICA COM TRÊS METROS DE ALTURA	146
4.10	COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE RUÍDO POR MEIO DA MODELAGEM DE BARREIRA ACÚSTICA	149
4.11	EXPERIMENTO FATORIAL: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA ENTRE OS FATORES DE ABSORÇÃO SONORA E ALTURA DA BARREIRA	151
5	BLOCOS DE CONCRETO DE RDC PARA SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA	154
5.1	PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO DE RCD	154
5.2	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE ACÚSTICA	156
5.2.1	<i>Métodos Aplicados para Obtenção da Massa Específica das Amostras.....</i>	<i>158</i>
5.3	COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DAS AMOSTRAS DOS BLOCOS DE RDC.....	159
5.3.1	<i>Coeficiente de Absorção e NRC das Amostras do Bloco Concreto de RDC.....</i>	<i>160</i>
5.3.2	<i>Coeficiente de Absorção e NRC das Amostras do Bloco de Concreto Convencional.....</i>	<i>162</i>
5.4	COMPARAÇÃO DE NRC DOS BLOCOS DE CONCRETO CONVENCIONAL E DE RCD	163
5.5	SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA DE BLOCO DE CONCRETO DE RCD	165
5.6	COMPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE ATENUAÇÃO SONORA DA BARREIRA ACÚSTICA	168
5.7	PERSPECTIVA DA BARREIRA ACÚSTICA EM TORNO DO CÂMPUS	170
6	CONCLUSÕES.....	173
6.1	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	176
	REFERÊNCIAS	177
	APÊNDICES.....	184

1 INTRODUÇÃO

Atualmente cerca da metade da humanidade vive em médias e grandes concentrações urbanas. Em virtude dessa realidade geográfica em constante transformação a *World Health Organization* enfatiza que aproximadamente 70% da população passará a viver em áreas urbanas até 2050 (WHO, 2019).

No Brasil, o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), em cooperação com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Núcleo de Economia Social, Urbana e Regional (NESUR), realizaram um estudo sobre “Caracterização e tendências da rede urbana”, considerando a urbanização do país como uma síntese de processos econômicos, tendo como principal indutor das transformações territoriais as atividades econômicas, especificamente a indústria e agropecuária. É mencionado que a urbanização, tornou-se um movimento que atingiu níveis relevantes de complexidade, sendo classificada como o fenômeno contemporâneo mais importante e favorável ao aumento de indústrias e serviços, ambos tecnologicamente avançados (IBGE, 2015).

A urbanização tem ocorrido de forma acelerada nas últimas décadas, provocando impacto negativo no meio ambiente. Alguns fatores associados ao progresso econômico como o surgimento de indústrias, o aumento significativo da frota de veículos, a mudança da paisagem sonora não só gerou problemas ambientais, mas também ocasionou efeitos adversos à saúde do homem (HAN et al., 2018). Estes fatores determinantes, tornaram-se um grande desafio do século XXI, pois há uma preocupação com a redução da poluição sonora nas cidades e em suas edificações, em virtude do bem-estar e da saúde da população urbana (VUYLSTEKE, 2014; WHO, 2019).

A combinação de diversos mecanismos, como obras da construção civil, tráfego de veículos, indústrias, alarmes, sirenes, dentre outros, têm elevado o nível de ruído urbano, e, contribuído para edificações cada vez mais desagradáveis. O ruído perturba a população desde os tempos que passaram a morar em cidades, prejudicando a qualidade de vida por permear as atividades humanas vinte e quatro horas por dia (BISTAFA, 2011).

Portanto, o ruído é um contribuinte significativo e permanente que pode gerar doenças ocupacionais em vários ambientes de trabalho (LOUPA et al., 2019). Os autores Bistafa, (2011), Lagonigro et al. (2018) e Loupa et al. (2019) destacam os efeitos diretos do ruído à saúde humana e diferentes consequências têm sido apontadas: falta de concentração, distúrbios do sono, distúrbios na saúde mental, perda da audição, estresse, hipertensão, riscos

cardiovasculares, baixa produtividade e interferência com a comunicação oral, ou seja, variando de simples incômodo à perda auditiva.

Os cidadãos europeus na grande maioria estavam expostos ao ruído urbano, logo, os responsáveis de órgãos públicos ambientais estabeleceram a necessidade urgente de uma tomada de decisão estratégica contra a poluição sonora. Sendo assim, o Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia adotaram a Diretiva relacionada à avaliação e gestão de ruído ambiental (DIRECTIVA 2002/49/CE). A Diretiva europeia contém instruções aplicáveis para minimizar o ruído onde os seres humanos estão expostos, especialmente, perto de escolas, universidades, hospitais, edificações, parques públicos e outras zonas tranquilas de aglomeração de pessoas (VUYLSTEKE, 2014).

A Diretiva Europeia determina a medição e identificação de níveis sonoros das cidades, elaborando mapas de ruído como resultados. No decorrer do texto, a Diretiva define elaboração de mapa de ruído como sendo uma compilação de dados sobre uma situação de ruído existente ou prevista em termos de um indicador de ruído, demonstrando a ultrapassagem de qualquer valor-limite pertinente em vigor (DIRECTIVA 2002/49/CE). A norma ainda ressalta uma definição de mapas estratégicos de ruído, isto é, um mapa para fins de avaliação global da exposição ao ruído em determinada zona, devido a diversas fontes de ruído, ou ainda o estabelecimento de previsões globais para a zona específica.

A elaboração de mapa acústico e dos planos de ação, segundo a Diretiva Europeia, é obrigação de todos os Estados-Membros para aglomerações com mais de 250 mil habitantes, e, se for necessário deve ser aprovado pelas autoridades competentes. Os planos de ação são destinados a gerir os problemas e efeitos do ruído, incluindo a redução do nível de pressão sonora (DIRECTIVA 2002/49/CE). Portanto, a Diretiva tem como intuito principal a definição de uma abordagem comum para evitar, prevenir e reduzir os efeitos prejudiciais da exposição ao ruído ambiental.

Países como a Europa, Estados Unidos, Austrália e Extremo Oriente, mostram a crescente preocupação com a população em relação à poluição sonora ambiental, adotando em seus planos de ação a utilização de barreiras acústicas. Esta preocupação com os efeitos negativos de ruído ambiental, levou, por sua vez, governos a elaborar um quadro legislativo que motivou as autoridades responsáveis a minimizar o ruído nos centros urbanos, semiurbanos e até mesmo rurais (KOTZEN; ENGLISH, 2009). Os autores ainda destacam que a necessidade de um ambiente mais silencioso fez com que o mercado de barreiras acústicas crescesse consideravelmente nos últimos anos em toda a Europa e em diversos países.

No Brasil, referente ao ruído ambiental, a Constituição Federal, no artigo 23, inciso VI, estabelece entre as competências comuns da União, Estados e Municípios, a proteção do meio ambiente e o combate da poluição em qualquer de suas formas (BRASIL, 1988). No capítulo VI, artigo 225 – Do meio ambiente, a Constituição Federal Brasileira estabelece que “Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida...” (BRASIL, 1988).

1.1 CONTEXTO DO PROBLEMA

A poluição sonora não é somente considerada um incômodo ambiental, igualmente sendo julgada como uma ameaça à saúde pública (PORTELA et al., 2018). Embora toda preocupação, normas de gestão e planos de ação sobre ruído ambiental, a Organização Mundial de Saúde (OMS) aponta que a poluição sonora em países europeus ocupou o segundo lugar entre uma série de problemas ambientais (GOZALO et al., 2016). Para os autores a infraestrutura de várias cidades, normalmente pelo fluxo de tráfego condicionado, produz um aumento considerável do impacto sonoro.

Os ruídos ambientais provenientes do tráfego rodoviário, aéreo, ferrovias, ferroviário e os mais diversos barulhos urbanos com os quais a sociedade convive em áreas urbanas, possivelmente provocam efeitos nocivos sobre a audição (BISTAFA, 2011). O autor ainda relata que pesquisas mostram que diferente do que comumente ocorre com pessoas que vivem em centros urbanos, certos grupos indígenas, que levam vida silenciosa, mantêm sua acuidade auditiva com o avançar dos anos.

A literatura disponível referente ao ruído ambiental, não tem sido, por sua vez, intensamente discutida no Brasil, bem como não há uma política nacional efetiva para o controle de ruído urbano. São poucas pesquisas no país que tem dado especial atenção ao assunto até o momento, quando comparado aos Estados Unidos, Canadá, China, países da Europa, entre outros.

Em universidades brasileiras como UFPR (Universidade Federal do Paraná), UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UFSC (Universidade Federal de Santa Catarina), UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro), UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte), dentre outras, encontra-se pesquisas que dão merecida atenção ao tema ruído ambiental (CALZA, 1999; CALIXTO, 2002; NAGEM, 2004; SOUSA, 2004; NARDI, 2008; RODRIGUES, 2010; ANDRADE, 2012;

ANSAY, 2013; LISOT, 2013; ZANNIN, et al., 2013; VIANNA, 2014; BARBOSA, 2015; PAZOS, 2015).

Observou-se por meio dos estudos que o conforto acústico, para o bem-estar da população, tornou-se diante da Engenharia Civil e do *Design Urbano* uma preocupação cada vez mais importante, do qual é uma seriedade reconhecida pelos médicos em particular (OANCEA et al., 2018). No entanto, ao associar o problema de ruído ambiental ao problema de geração de resíduos da construção, a Engenharia Civil pode contribuir de forma positiva na redução do impacto ambiental.

Devido à demolição, manutenção e reconstrução de várias estruturas no setor da engenharia civil, uma quantidade significativa de resíduos RCD (resíduos da construção e demolição) é gerada a cada ano em todo o mundo (MUDULI; MUKHARJEE, 2019). De acordo com os autores El-Hassan et al. (2019), a gestão de resíduos de construção e demolição é uma questão urgente e global. Os pesquisadores ainda destacam um exemplo do Reino Unido, que todos os anos são descartados nos aterros aproximadamente 20 milhões de toneladas de detritos, sendo que, cerca de 30% e 50% são resíduos de alvenaria e concreto, respectivamente.

A união para a solução desses problemas consiste na utilização de diversos resíduos que podem ser implementados na construção mantendo a qualidade do produto, tanto quanto aos materiais clássicos. A integração de diversos resíduos tem sido estudada por muitos pesquisadores, objetivando não só o comportamento mecânico, mas também o comportamento acústico dos materiais (FERRANDIZ-MAS; GARCIA-ALCOCEL, 2012; GHIZDAVET et al., 2016; OANCEA et al., 2018). Os autores Duarte et al. (2019), destacam que atualmente a principal dificuldade consiste na falta de confiança na qualidade de produtos de resíduos da construção e demolição (RCD).

Portanto, com base em incentivos e importância do assunto para o meio acadêmico, assim como para a sociedade em geral, esta tese busca compreender o ruído ambiental, mais especificamente, o impacto sonoro e o controle de ruído com a inserção de barreira acústica.

Diante do exposto, pretende-se responder a seguinte pergunta:

Como atenuar o impacto sonoro em locais estratégicos, a fim de proteger áreas consideradas expostas a determinadas fontes de ruído, em específico, áreas universitárias próximas a vias de tráfego de veículos com fluxo contínuo?

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Esta pesquisa, limita-se à elaboração de mapas de ruído e simulação de barreiras acústicas simples, com o intuito de minimizar o incômodo decorrente do ruído de tráfego de veículos sobre a população acadêmica. Para facilitar o transporte, a montagem de equipamentos e o deslocamento de voluntários, optou-se por escolher a Universidade Tecnológica Federal do Paraná como área de estudo. E, também, por ser uma área aberta, sem haver possíveis reflexões sonoras de edificações, conseqüentemente, para uma melhor projeção de barreiras em campo livre.

Importante salientar que, o estudo de mapeamento acústico foi realizado no ano de 2017 e 2018. Neste período a norma ABNT NBR 10151:2000 (Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento) estava em vigor. Em 31 de maio de 2019, a ABNT publicou a norma ABNT NBR 10151:2019 (Acústica – Medição e Avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral), que revisa a norma ABNT NBR 10151:2000.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

A presente tese tem como objetivo geral estudar barreira acústica simples de blocos de concreto, por meio de simulação computacional. Para tanto, inseriu-se na biblioteca do *software SoundPlan* um novo coeficiente de absorção sonora que caracteriza blocos de concreto de resíduos da construção e demolição (RCD), representando uma solução sustentável para os problemas de resíduos e o controle de ruído de tráfego em um câmpus universitário na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil.

1.3.2 Objetivos Específicos

A pesquisa apresenta os seguintes objetivos específicos:

- Avaliar *in loco* os níveis sonoros das áreas circundantes do câmpus universitário;
- Analisar o comportamento da propagação sonora por meio de modelagem computacional do câmpus universitário;

- Avaliar a atenuação sonora de barreira acústica de concreto em um cenário real, com o intuito de validar o modelo computacional;
- Realizar simulação computacional de barreira acústica para o câmpus universitário;
- Realizar um experimento fatorial com as variáveis: coeficiente de absorção sonora e altura da barreira acústica, com a finalidade de analisar os efeitos principais e a interação entre os fatores;
- Produzir blocos de concreto para barreira acústica, derivados de resíduos de construção e demolição (RCD);
- Medir o coeficiente de absorção sonora das amostras do bloco de concreto de RCD para inserir como um novo material na biblioteca do programa de simulação, *SoundPlan*;
- Medir o coeficiente de absorção sonora das amostras do bloco de concreto convencional para comparação com as amostras de RCD e com valores publicados na literatura.

1.4 JUSTIFICATIVAS

Dando ênfase à informação da *World Health Organization*, a urbanização é uma das principais tendências globais do século XXI, tendo um impacto significativo sobre a saúde humana (WHO, 2019). Porquanto, corroborando a escolha que aborda o assunto desta tese, assim como justificar a importância do tema, estudos mostram que pesquisadores desde a década de 1970 já ratificavam que a atenção dada à poluição sonora nos dias atuais é tão importante quanto à atenção concedida à poluição da água e atmosférica (NIEMEYER; SLAMA, 1998; RODRIGUES, 2010; KING; MURPHY, 2016). Conforme Cowan (2016), os resultados de estudos publicados desde a década de 1970, apontam que o ruído tem ligação às dificuldades de aprendizagem, sendo esta relação um fator determinante que restringe a capacidade de comunicação e ensino.

Os pesquisadores Sala e Rantala (2016) publicaram sobre “*Acoustics and activity noise in school classrooms in Finland*”. Nessa pesquisa os autores afirmam que uma sala de aula deve ter condições que facilitem o discernimento entre as palavras, a compreensão da linguagem falada e o conteúdo da mensagem. E, para que isto aconteça o ambiente precisa estar livre de fatores externos e internos, referindo-se ao ruído ambiental e ao melhoramento efetivo da qualidade acústica de um ambiente de ensino.

Na mesma linha de pesquisa, os autores Peng et al. (2018) acentuam que o ruído ambiental que atinge sala de aula, não só dificulta que os alunos ouçam claramente, mas também exige um tom de voz mais alto do professor, portanto, um ambiente acústico favorável

para sala de aula ajuda a melhorar a qualidade e a eficiência do ensino, além de garantir a saúde mental e física de professores e alunos. Uma vez que, pode haver alunos que possuem necessidades adicionais de aprendizado, correndo o risco dos efeitos negativos devido à acústica deficiente no ambiente escolar (CONNOLLY et al., 2015).

Infelizmente, em muitas escolas não foram encontradas as melhores condições de comunicação e aprendizagem, pois o ruído exige um maior esforço auditivo em locais de estudo (SALA; RANTALA, 2016; SILVA et al., 2016). O impacto do ruído urbano tem afetado o ambiente de trabalho, propagando-se para escolas, escritórios, residências, entre outros recintos.

A literatura certifica que o ruído em ambientes provoca estresse e incômodo significativo, embora, o reconhecimento desses efeitos nocivos à saúde humana começou já na antiguidade (BIES; HANSEN, 2009). Ao passo que, fora do ambiente de trabalho, o ruído pode afetar negativamente as atividades habituais como o sono, conversação, relaxamento e concentração, assim causando impacto psicológico (BISTAFA, 2011). Em geral, na sociedade há três tipos de exposição ao ruído que podem ser claramente reconhecidos, são exposição ao ruído ocupacional, exposição ao ruído social e exposição ao ruído ambiental em áreas urbanas (SIANO, 2012).

Os elevados níveis de ruído em meios urbanos, são gerados principalmente por atividades humanas relacionadas diretamente ao tráfego de veículos, construção civil, segurança, indústria, comércio e recreação. Existem pesquisas em pontos específicos de cidades que conduzem análises de ruído, principalmente, relacionadas a atividades de transporte (PACHECO et al., 2016). Os autores mencionam que a análise sonora tem tido importante relevância, pois a exposição a elevados níveis de ruído por longos períodos pode causar tanto o desconforto como sérios danos à saúde dos seres humanos.

Com base neste contexto, Iida (2005) relata que o ruído contribui à principal causa de reclamações sobre as condições ambientais. Para o autor, ruídos intensos podem prejudicar o desempenho de atividades que exigem atenção, concentração mental, ou velocidade e precisão dos movimentos. Tarefas que exigem informações verbais são prejudicadas pelo simples fato de pessoas terem que falar num tom mais elevado e prestarem mais atenção para serem compreendidas, devido ao efeito do mascaramento. Os níveis de ruído entre 70 e 90 dB são suficientes para dificultar a comunicação e concentração.

O ideal é manter o nível de ruído ambiental abaixo de 70 dB (IIDA, 2005). No Brasil, mesmo sendo de forma sucinta, a norma NBR 10151:2000 (Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade), recomenda um nível de ruído máximo de 70 dB para área predominantemente industrial, porém para área estritamente residencial urbana

ou de hospitais ou de escolas, o nível máximo é de 50 dB no período diurno e máximo de 45 dB no período noturno. Para fins de comparação, em novas construções de rodovias e ferrovias próximas a zonas residenciais, em alguns países da Europa, o limite máximo tolerável de perturbação sonora não passa de 65 dB no período diurno e de 60 dB no período noturno (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Não há dúvida de que a principal fonte de ruído na cidade é o fluxo de veículos, caracterizada como ruído ambiental, e, que 70% (setenta por cento) do ruído urbano é produzido por tráfego rodoviário (MEDINA; MONTAÑO, 2010; SIANO, 2012). Porquanto, observa-se que a maioria dos estudos publicado nos últimos 50 (cinquenta) anos, sobre o distúrbio do sono, está relacionado ao ruído ambiental proveniente de fontes de transporte. Pesquisas destacam que a gestão do ruído de tráfego e de controle deve tender a proteger a saúde pública, e afirmam que a regulamentação do ruído veicular não é simples, porém necessário (MEDINA; MONTAÑO, 2010; SIANO, 2012).

Em vista disso, uma implementação comum de controle de ruído ambiental geralmente assume a forma de barreira acústica (BIES; HANSEN, 2009). Na Inglaterra, as barreiras acústicas para atenuar ruído de trânsito vêm sendo instaladas desde a década de 1970, com o intuito de reduzir o nível sonoro, a fim de manter ou ao menos melhorar a qualidade de vida da população (KOTZEN; ENGLISH, 2009). Os autores ainda mencionam que em diversos países do Reino Unido, continuará crescendo a demanda por barreira acústica, em resposta a uma conscientização aos projetistas e urbanistas no controle do ruído ambiental.

Assim, a pergunta que direciona a presente pesquisa tem um dos propósitos de justificar a importante contribuição de conscientizar, não só os pesquisadores da área acadêmica, como também os engenheiros civis, os arquitetos urbanistas, os institutos de pesquisa e planejamento urbano com relação à decisão de atenuar, numa base prioritária, os ruídos em áreas habitadas, visando conforto e qualidade de vida, visto que diversos estudos demonstram que está continuamente agravando o bem-estar da sociedade nos grandes centros urbanos.

No tocante a mapa de ruído e simulação computacional de barreira acústica contidos neste estudo, exemplos práticos relevantes, referente à avaliação e atenuação de ruído ambiental em torno de câmpus universitários, vem a somar aos poucos estudos no Brasil, já que a execução de barreiras para atenuação de ruídos urbanos ainda é muito recente no país. Nota-se que os pesquisadores querem que suas preocupações sobre acústica ambiental vão além de aspectos teóricos, levando por meio destas pesquisas informações técnicas ao poder público, assim como à sociedade atingida que desconhece o seu direito e a existências de normas para controlar o ruído em áreas urbanas.

Um outro ponto importante desta tese é a abordagem sustentável para a construção de barreiras acústicas, o que inclui a reciclagem de subprodutos da construção civil, ou seja, o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição (RCD). Pois, de acordo com os autores Marie e Quiasrawi (2012) e Muduli e Mukharjee (2019), no mundo, nas últimas décadas, a produção média anual de concreto é de cerca de uma (1) tonelada por ser humano, um crescimento significativo devido à demanda das indústrias de construção. O problema é que os resíduos da construção ainda são descartados em aterros ou colocados em lugares desabitados, isso resulta em uma escassez de espaços de aterros e aumento nos custos para o descarte (BRAVO et al., 2015; MUDULI; MUKHARJEE, 2019).

No Brasil, em 2016, os municípios coletaram aproximadamente 45,1 milhões de toneladas de RCD. Este panorama foi realizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. O estudo certifica que, a situação de resíduos de construção e demolição exige atenção especial, pois, a quantidade total de RCD é ainda maior, dado que os municípios coletam apenas os resíduos lançados ou abandonados nos logradouros públicos.

O Quadro 1, reporta a quantidade de RCD coletados pelos municípios brasileiros, comparando os anos de 2015 e 2016.

Quadro 1 – Quantidade de RCD coletado no Brasil, comparação entre o ano de 2015 e 2016.

Quantidade total de RCD coletado pelos municípios no Brasil				
Brasil	2015		2016	
	RCD coletado (t/dia)	Índice (kg/hab./dia)	RCD coletado (t/dia)	Índice (kg/hab./dia)
	123.721	0,605	123.619	0,600

Fonte: Pesquisa ABRELPE/IBGE (2017).

De acordo com os autores Oltean-Dumbrava e Miah (2016) e Oancea et al. (2018), a implementação de resíduos para a fabricação de painéis de barreiras acústicas é um motivo relevante na determinação da sustentabilidade.

Assim, originalmente, a presente pesquisa apresenta um benefício ambiental duplo, por um lado, a redução dos níveis de poluição sonora e, por outro lado, a reciclagem de subproduto da construção civil, material utilizado na construção de barreira acústica.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em seis capítulos da seguinte forma:

- O primeiro capítulo dispõe a introdução, contexto do problema, delimitação do tema, objetivos, questão orientadora e justificativas.

- O capítulo dois apresenta o referencial teórico e a revisão de literatura. O referencial teórico aborda os conceitos e definições de assuntos da literatura, os quais são relevantes para este estudo. A revisão bibliográfica apresenta um breve levantamento de artigos científicos relacionados ao assunto desta tese.
- O capítulo três descreve a escolha da abordagem metodológica e os procedimentos adotados para o desenvolvimento da tese.
- O capítulo quatro apresenta os resultados sobre: mapeamento dos níveis sonoros em torno do câmpus universitário, mapa de ruído de forma gráfica (modelagem computacional), simulação de barreira acústica com material disponível na biblioteca do programa *SoundPlan*.
- O capítulo cinco apresenta sobre a produção, preparação de amostras, ensaio acústico e simulação computacional referente ao bloco de concreto de resíduos de construção e demolição (RCD). Apresenta também, uma comparação dos NRCs (*Noise Reduction Coefficient*) com o bloco de concreto convencional (bloco de mercado).
- O capítulo seis apresenta as conclusões deste estudo e estabelece propostas para trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

O presente capítulo tem por objetivo principal apresentar a fundamentação teórica desta pesquisa, que está dividida em duas partes: Referencial teórico e Revisão bibliográfica.

O referencial teórico consiste em uma abordagem direcionada a conceitos e definições de assuntos da literatura considerados relevantes para o desenvolvimento da tese.

A revisão bibliográfica permite posicionar o trabalho em relação a outros estudos já realizados e que estão relacionados ao assunto desta pesquisa.

2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

Estão apresentados nesta seção os conceitos e definições de temas da literatura, os quais são pertinentes à esta pesquisa. Primeiro, encontra-se descrito uma breve caracterização sobre o ruído, tipos de fontes geradoras de ruído, medição de ruído ambiental, propagação sonora ao ar livre e controle de ruído. Na sequência, aborda-se temas sobre mapa de ruído, barreiras acústicas, *software* para predição de ruído ambiental (*SoundPlan*) e experimento fatorial (análise da influência da altura da barreira acústica e do coeficiente de absorção em relação à atenuação sonora).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE RUÍDO

Para todos os efeitos práticos, o ruído pode ser definido como som indesejado, conseqüentemente, as características de ruído são sobretudo características sonoras (WANG et al., 2005; BISTAFÀ, 2011; HANSEN et al., 2017). O termo “som” refere-se a qualquer energia que seja capaz de estimular uma excitação do sistema auditivo que resulta na sua percepção (COWAN, 2016).

Em vista disso, a definição de ruído como som indesejado não se aplica a todos os tipos de ruído, também, pode-se tornar uma ferramenta útil, como uma sirene de ambulância ou sirene de caminhão de bombeiros, garantindo que os “sons indesejáveis” possam ser ouvidos por aqueles que precisam ouvi-los. Esse ruído não é necessariamente diferente do ruído indesejado, é apenas o ruído colocado para um fim específico (EVEREST; POHLMANN, 2009).

A natureza do som pode ser definida como uma variação de pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo. Entretanto, a pressão de limiar de audição é definida como a menor

variação de pressão ambiente detectável pelo ouvido humano sendo da ordem de $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}^1$. E, a variação da pressão ambiente capaz de provocar dor é o limiar da dor, também conhecida como limiar de desconforto, todavia, distintos valores de pressão são atribuídos ao limiar da dor, entre 20 e 200 Pa (BISTAFA, 2011). Esta ampla gama levou ao uso de uma escala logarítmica para expressar as pressões sonoras (WANG et al., 2005). Portanto, o decibel (dB) é uma unidade adimensional usada para expressar o nível de pressão sonora (*Sound Pressure Level* – SPL ou L_p); o termo “nível” é usado para enfatizar o fato de que um logaritmo de uma razão está sendo expresso, em outras palavras, a medida física preferencial para que se possa caracterizar a sensação subjetiva dos sons é o nível sonoro (WANG et al., 2005; BISTAFA, 2011). Mais especificamente, o nível de pressão sonora é definido como exposto na Equação 1.

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{P^2}{P_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{P_{ref}} \right) = dB \quad (1)$$

onde:

SPL = Nível de pressão sonora (NPS), dB;

P = Pressão sonora, μPa ou Pa;

P_{ref} = 20 μPa (Micropascals) ou 2×10^{-5} Pa (Pascals) ou 0,00002 Pa (Pascals).

Para Wang et al. (2005), o termo “nível sonoro” é constantemente a palavra utilizada como sinônimo de nível de pressão sonora, sendo uma quantificação unicamente objetiva do ruído com base na propriedade física medida, pressão sonora.

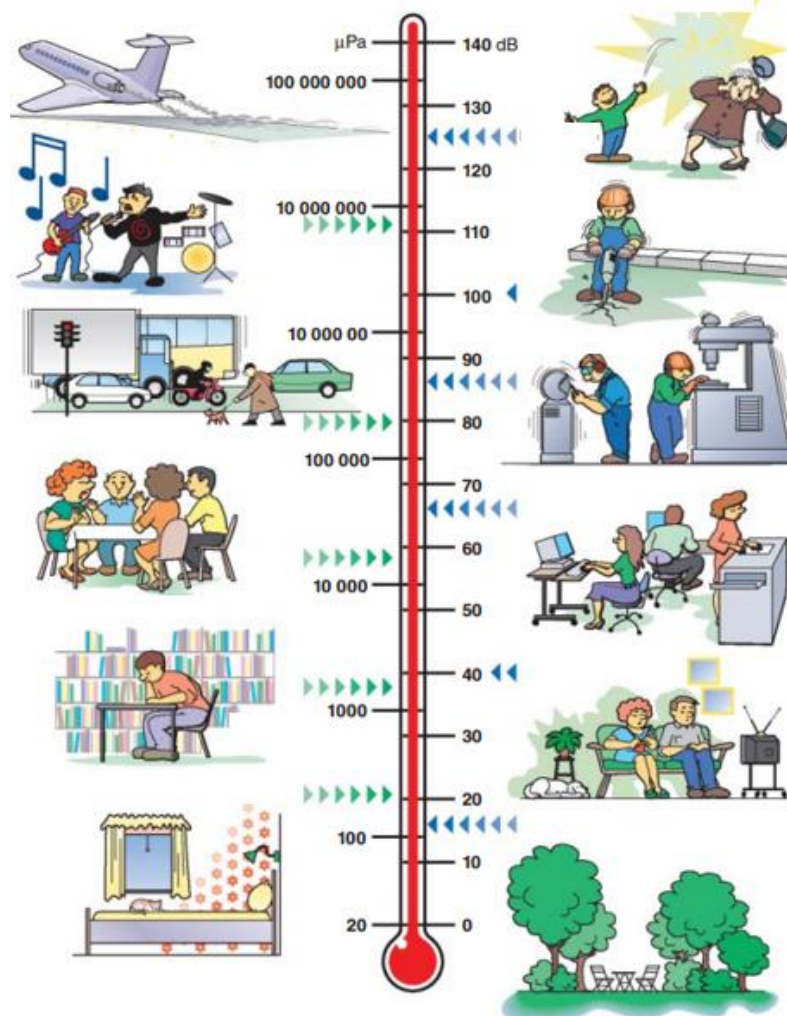
2.3 NÍVEL DE PRESSÃO SONORA

Nas últimas décadas, teve-se uma maior preocupação com estudos sonoros referentes aos grandes centros urbanos (WANG et al., 2005; BISTAFA, 2011). Pois, os níveis sonoros urbanos são uma mistura complexa de ruído de fábricas, indústrias, máquinas, pessoas e do sistema de transporte (rodoviário, ferroviário e aéreo). Dentre o conjunto de deslocamento, o ruído de trânsito veicular é considerado umas das principais fontes de poluição sonora ambiental (WANG et al., 2005; BISTAFA, 2011; ERMANN, 2015).

A Figura 1 ilustra pressões sonoras e níveis de pressão sonora para sons comuns do dia a dia, e as correspondentes fontes sonoras e sensações subjetivas de intensidade dos sons associados.

¹ Pa é o símbolo de pascal, unidade de pressão no Sistema Internacional de Unidade de Medida. Corresponde a 1 newton por metro quadrado (1 N/m^2).

Figura 1 – Pressão sonora (μPa) e nível de pressão sonora (dB).



Fonte: Jacobsen e Juhl (2013).

Para os autores Blanco e Flindell (2011), o ruído de trânsito, também, é considerado indesejável, contudo não é uma tarefa fácil de quantificar com precisão o quão indesejável o ruído realmente poderá ser. No entanto, segundo Ibarra et al. (2017), o ruído urbano produzido pelos veículos é um dos aspectos mais relevantes da vida urbana, sendo assim, qualquer estudo destinado a melhorar o conforto da sociedade deve levá-lo em consideração.

Os autores Blanco e Flindell (2011), observaram-se que em média, a proporção de pessoas que apresentam incômodos significativos aumenta conforme os níveis de ruído de tráfego se tornam mais elevados. Em velocidades acima de 100 quilômetros por hora os ruídos dos pneus são mais perceptíveis, enquanto que, em velocidades mais baixas, os ruídos do motor tendem a dominar (WANG et al., 2005).

Diversas características do ruído de tráfego são intrínsecas ao veículo em funcionamento, porém outras dependem da densidade de tráfego, idade e composição da frota, paradas obrigatórias no trânsito ou cruzamentos, modo de condução do veículo, entre outros

fatores (BISTAFA, 2011; SIANO, 2012). Um fator que influencia diretamente, é o gradiente da estrada, que também pode afetar a emissão de ruído veicular, como por exemplo, um gradiente de estrada de 5% adiciona cerca de 3 dB ao ruído do caminhão, enquanto o efeito nos carros é geralmente insignificante.

Por meio de estudos realizados, estimam-se que metade da população em áreas urbanas com mais de 250.000 habitantes estão expostos a níveis superiores a 55 dB, sendo este valor uma referência mínima para ruído ambiente, durante um período de 24 horas (KEMPEN; BABISCH, 2012). A Diretiva Europeia (Directiva 2002/49/CE), entende-se por ruído ambiente, um ruído externo indesejado ou prejudicial à saúde, sendo o mesmo produzido por atividades humanas, o que inclui ruído emitido por meios de transportes, tráfego veicular, ferroviário, aéreo, bem como instalações industriais.

O ruído dissipa-se à medida que se expande de uma fonte local em uma área cada vez maior, no entanto a onda sonora que se afasta de sua fonte encontra diversas condições que afetam suas características até chegar ao sistema auditivo (COWAN, 2016). Portanto, os regulamentadores e os membros políticos precisam entender exatamente o que significa realmente a expressão “incômodos significativos”, porque sem esse conhecimento é difícil equilibrar os custos para implementar um sistema de gestão com o intuito de mitigar o ruído ambiental (BLANCO; FLINDELL, 2011).

2.4 MEDIDOR DE NÍVEL DE RUÍDO AMBIENTAL

Medições de diversas grandezas acústicas, geralmente, são exigidas por programas de controle de ruído, a fim de determinar a eficácia do procedimento adotado para a prevenção do ruído e o controle da poluição sonora. Avaliações de ruído ambiental devem ser realizadas para determinar a conformidade com as normas e legislações relativas à avaliação e gestão de ruído (BARRON, 2003).

É importante que o equipamento de medição de nível sonoro seja selecionado adequadamente para monitorar e medir as propriedades do ruído. Quando há uma situação na qual precisa avaliar a severidade do ruído ambiental, pode-se medir apenas o nível global de pressão sonora ou o nível ponderado “A”, usando um simples medidor (BARRON, 2003).

Os níveis de ruído são comumente medidos por um instrumento portátil chamado medidor de nível sonoro, também conhecido por sonômetro, que fornece uma avaliação de número único da pressão variável no tempo, em decibéis (dB), ou a extração da energia sonora de um ruído em faixas de frequências, ou seja, espectros sonoros mais detalhados (WANG et

al., 2005; BISTAFA, 2011; JACOBSEN; JUHL, 2013). De acordo com Barron (2003), há situações em que, precisa-se de uma análise mais detalhada do ruído. Nestes casos, podem ser feitas medições do nível de bandas de oitava ou bandas de um terço de oitava.

Quando o ruído vem de muitas direções diferentes (devido a múltiplas fontes e reflexões de paredes, barreiras, solo, etc.), o microfone de medição deve responder de forma idêntica aos vários ruídos, independentemente do ângulo de incidência. Portanto, uma das partes mais importantes de um medidor de nível sonoro é o microfone, pois o mesmo transforma o ruído em um sinal elétrico equivalente, condicionado e expresso em termos de nível de pressão sonora (WANG et al., 2005). Para Bistafa (2011), o microfone é um componente básico de instrumentos para medidas acústicas, sendo um transdutor eletroacústico, sensível à pressão sonora. Em medições de ruído, o microfone mais utilizado é o de ½ polegada, pois o mesmo oferece resposta em frequência, direcionalidade e sensibilidade (BISTAFA, 2011).

Encontra-se disponível no mercado diversos dispositivos desde o simples até os analisadores digitais mais avançados, todavia, o sonômetro simples não é equipado com filtros de análise de frequência, este apenas fornece o nível sonoro total do som incidente no microfone.

2.4.1 Filtros Ponderadores

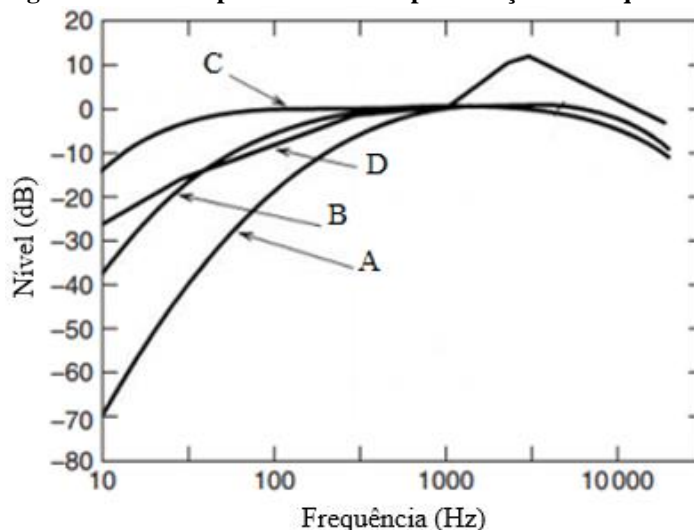
A sensibilidade do mecanismo auditivo varia significativamente às diferentes frequências contidas em nível sonoro (BISTAFA, 2011). Em particular, o ouvido humano é menos sensível a frequências baixas do que a médias e altas frequências (ESPINOZA, 2017). A intenção original era simular um ouvido em vários níveis, mas há muito tempo percebeu-se que o sistema auditivo humano é muito complicado, por isso, adota-se uma curva de ponderação que são utilizadas para modificar o espectro sonoro de acordo com a sensibilidade do ouvido humano nas diversas frequências (WANG et al., 2005; BISTAFA, 2011; ESPINOZA, 2017).

São incorporados nos medidores de nível de pressão sonora os filtros ponderadores que aproximam a sensação subjetiva de intensidade dos níveis sonoros, para tanto, aplica-se no sinal de entrada funções de transferência com base nas curvas isofônicas, produzindo assim um único número que se aproxima com o nível de audibilidade (BISTAFA, 2011). Portanto, os filtros ponderadores são A, B, C e D, conforme destaca a Figura 2.

Este sistema de ponderação específico é acrescentado no símbolo de grandeza, por exemplo, L_{X}^{eq} e o seu resultado expresso em decibels (dB), a letra “X”, refere-se ao tipo de filtro ponderador utilizado para fazer as medições (WANG et al., 2005). O nível de pressão

acústica com escala de ponderação “A” é a medida de som mais amplamente utilizada, por correlacionar-se, em geral, muito melhor com o efeito subjetivo do ruído, como por exemplo, ruído de tráfego de veículos (BISTAFA, 2011; HANSEN, et al., 2017).

Figura 2 – Curvas padronizadas de ponderação de frequência.



Fonte: Jacobsen e Juhl (2013).

2.5 PRINCIPAIS DESCRITORES PARA AVALIAR RUÍDO AMBIENTAL

Os órgãos normalizadores e agências reguladoras de cada país procuram estabelecer métodos, a fim de quantificar e avaliar o impacto do ruído ao que os seres humanos estão expostos (BISTAFA, 2011). Tais métodos encontram-se associados a critérios de aceitabilidade que refletem o grau de incômodo ou interferência com a vida diária da sociedade, bem como, torna-se também a base de normas e legislações aplicáveis.

É fato que os ruídos do cotidiano são de natureza muito variável, o que torna complexa a avaliação desses problemas (BISTAFA, 2011). Assim, a grandeza como o nível equivalente (L_{eq}), é o indicador de nível sonoro mais adequado para caracterizar o efeito do som num determinado período (MATEUS, 2014). Mas, de acordo com Bistafa (2011) e Cowan (2016), existem muitos outros descritores utilizados para diversos fins, por exemplo, níveis estatísticos (L_{10} , L_{50} , L_{90}), nível dia (L_d), nível dia e noite (L_{dn}).

2.5.1 Nível de Pressão Sonora Contínuo Equivalente (L_{eq})

A intensidade da energia sonora é descrita por muitas derivações matemáticas, por isso é importante que descritores como o nível equivalente (L_{eq}) e os níveis estatísticos, sejam consistentes e relevantes para a situação descrita (COWAN, 2016). Diferentes normas e

legislações relativas à exposição ao ruído utilizam a grandeza L_{eq} (nível equivalente), assim como os níveis estatísticos, os quais são geralmente aplicados na avaliação de ruídos de sistemas de transporte, especificamente, tráfego de veículos, sobrevoos de aeronaves e de linhas ferroviárias (BISTAFA, 2011).

Assim, o nível de pressão sonora contínuo equivalente é o descritor de energia sonora mais comum. O L_{eq} pode ser considerado como um nível médio de pressão sonora durante um período de registro (LONG, 2006; BISTAFA, 2011; COWAN, 2016; HANSEN, et al., 2017). Matematicamente é escrito como uma integral durante um intervalo de tempo, Equação 2.

$$L_{eq} = 10 \log \left[\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L_p(t)/10} dt \right] dB \quad (2)$$

onde:

L_{eq} = Nível equivalente, dB;

$L_p(t)$ = Nível sonoro no instante t ;

T = Intervalo de tempo de registro.

O autor Bistafa (2011), salienta que quando o $L_p(t)$ é o nível sonoro A -ponderado, logo a unidade de L_{eq} será determinada por L_{Aeq} em dB. Segundo Licitra (2013), as métricas de ruído com base em L_{eq} são importantes para fins legais e para planejamento e gestão sonora.

2.5.2 Níveis Estatísticos (L_{10} , L_{50} , L_{90})

De acordo com Bistafa (2011) e Cowan (2016), os níveis sonoros denominados como níveis estatísticos também são chamados de níveis de excedência, sendo os mais utilizados o L_{10} , L_{50} , e L_{90} , que são respectivamente os níveis sonoros excedidos em 10%, 50% e 90% do tempo de medição. A quantidade L_n é o nível de ruído (em dB) que é excedido em “ n ” por cento do tempo e a quantidade, L_{An} é o nível sonoro ponderado em “ A ” [dB]. Exemplo, quando escrito $L_{A90(10 \text{ min.})}$, significa que o nível sonoro foi excedido em 90% do tempo de medição (HANSEN et al., 2017).

O nível estatístico L_{10} é utilizado principalmente para avaliar ruído de tráfego, o L_{50} é uma medida útil da audibilidade do ruído de uma instalação planejada, e o L_{90} é utilizado para caracterizar o ruído de fundo, sendo este o nível de ruído subjacente que está presente mesmo durante as partes mais silenciosas do período de medição. Para fins de regulamentação, estes níveis são todos normalmente expressos em dB (BIES; HANSEN, 2009).

Nos Estados Unidos, a Administração Federal de Rodovias (*Federal Highway Administration*, FHWA) adota o L_{10} como grandeza para avaliar o ruído em loteamentos

destinados a residências. O nível critério (nível máximo recomendável para a grandeza) para áreas onde é preciso manter a tranquilidade, como anfiteatros ao ar-livre e algumas áreas de parques, é $L_{A10} = 60$ dB. Em áreas residenciais, escolas e edificações semelhantes, o nível critério é $L_{A10} = 70$ dB. Por conseguinte, a construção de estradas nos Estados Unidos que precisam de aprovação em nível federal obrigatoriamente deve atender a esses níveis critérios (BISTAFA, 2011).

Encontra-se na literatura mais dois níveis estatísticos o L_1 e o L_{99} . O valor L_1 é uma indicação do nível máximo ocorrido durante um período de medição e o L_{99} é uma indicação do nível mínimo (COWAN, 2016). O autor ainda destaca que as grandezas L_{eq} (nível equivalente) e L_{dn} (nível dia e noite) são os descritores mais comuns usados para avaliar exposições ao ruído.

2.5.3 Nível Dia e Noite (L_{dn})

O nível L_{dn} (nível dia e noite) é considerado uma medida semelhante ao nível L_{eq} (nível equivalente), sendo calculado durante um período de vinte e quatro horas (24h), tendo a diferença de que os níveis sonoros, durante o período noturno, são penalizados em 10 dB, para todos os valores medidos, assim, leva-se em conta a sensibilidade acrescida ao ruído durante as horas normais de sono (BISTAFA, 2011; COWAN, 2016).

O nível dia e noite (L_{dn}) pode ser calculado a partir do nível equivalente (L_{eq}) quando obtidos a cada hora do dia. A Equação 3 expressa o método de cálculo, que segundo Wang et al. (2005) e Bistafa (2011) é uma simples forma de cálculo do L_{dn} .

$$L_{dn} = 10 \log \left\{ \frac{1}{24} [15x10^{L_d/10} + 9x10^{(L_n+10)/10}] \right\} \quad (3)$$

onde:

L_d é o nível equivalente do período diurno das sete às vinte e duas horas (07h às 22h);

L_n é o nível equivalente do período noturno das vinte e duas horas às sete horas da manhã (22h às 7h).

A Agência Portuguesa do Ambiente (2011), em seu guia prático para medições de ruído ambiental, salienta que quando for preciso recorrer à técnica de amostragem, pode optar-se por medir durante o período de referência de interesse, sendo os indicadores de ruído L_d , L_e , L_n , L_{den} e L_{Aeq} .

- L_d (indicador de ruído diurno): o indicador de ruído associado ao incômodo durante o período diurno;

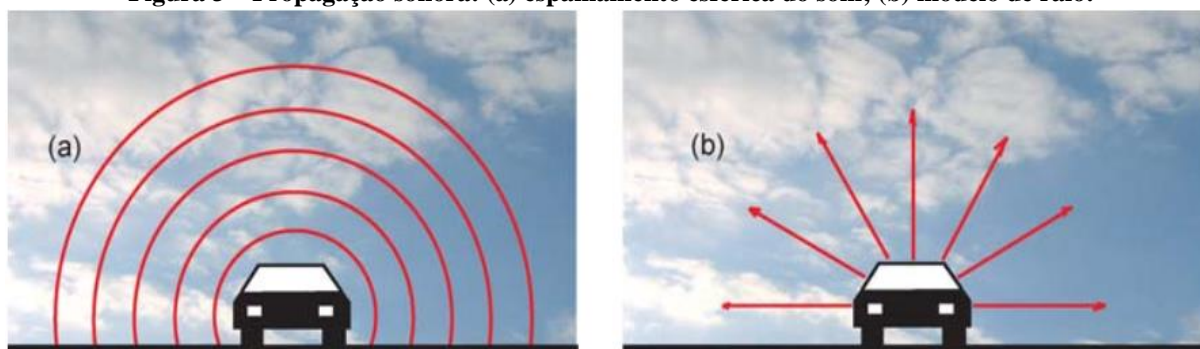
- L_c (indicador de ruído do fim-de-tarde): o indicador de ruído associado ao incômodo durante o período vespertino;
- L_n (indicador de ruído noturno): o indicador de ruído associado a perturbações do sono;
- L_{den} (indicador de ruído dia-fim-de-tarde-noite): o indicador de ruído associado ao incômodo geral.

2.6 RUÍDO AMBIENTAL: PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE

A Comissão Europeia menciona que a poluição sonora ambiental, refere-se ao ruído gerado por meio de tráfego rodoviário, ferroviário e aeroportuário, assim como indústria, construção e inúmeras outras atividades ao ar livre. Em vista disso, Long (2006) e Bistafa (2011), denotam que a fonte sonora, a trajetória de transmissão e o receptor são os três componentes utilizados para estudar a propagação sonora ao ar livre.

O som se propaga a partir de uma fonte como uma série de ondas de pressão rapidamente flutuantes que se expandem esfericamente à medida que se afastam da fonte (Figura 3a). Tais ondas de pressão criam a sensação de ruído quando atingem o ouvido humano. Embora o som viaje como ondas, muitas vezes é conveniente modelar a propagação sonora como linhas retas ou raios, que chegam ao receptor diretamente ou indiretamente, após serem refletidos ou difratados por superfícies intermediárias (Figura 3b).

Figura 3 – Propagação sonora: (a) espalhamento esférico do som; (b) modelo de raio.



Fonte: Kotzen e English (2009).

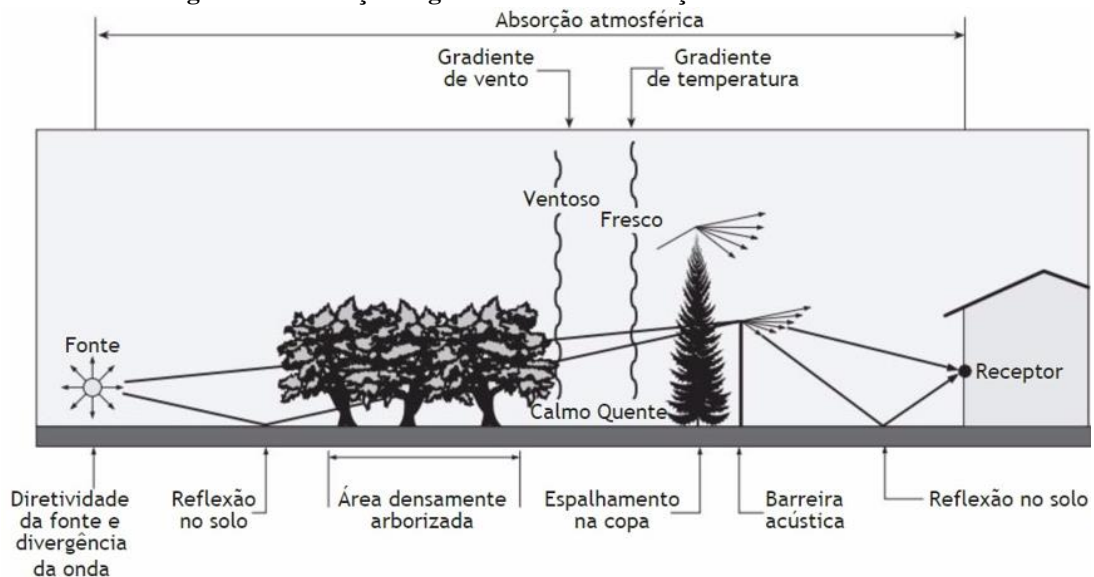
Entretanto, existem diversos efeitos que influenciam na propagação e atenuação sonora, interferindo o nível sonoro atingir o receptor, tais efeitos incluem: absorção atmosférica, reflexão e absorção do solo, barreiras artificiais e naturais, dispersão devido à vegetação e à turbulência atmosférica, efeitos meteorológicos como gradientes do vento e da temperatura (LONG, 2006; BISTAFA, 2011; LICITRA, 2013; HANSEN et al., 2017).

A Figura 4 ilustra as variáveis relevantes quanto à atenuação sonora. Nota-se que são as reflexões no solo que interferem com o som direto. Já a atenuação adicional ao ruído, pode

ocorrer por meio de áreas densamente arborizadas, barreiras artificiais ou naturais. Vale destacar que, o espalhamento sonoro na copa de árvores pode minimizar a eficácia das barreiras (BISTAFA, 2011). O autor ainda revela que folhagem, pequenos ramos e arbustos têm a propriedade de absorver o som, mesmo sendo de forma parcial. A mesma afirmação não é válida para troncos, ramos grandes e folhagem densa, pois desta forma espalha o som. Entretanto, na prática um cinturão verde interposto entre a fonte e o receptor depende muito mais das características de vegetação como densidade, largura e altura do que de eventuais diferenças entre formas, tipos de folhagem e galhos.

Para Cowan (2016), a vegetação na prática fornece pouca ou nenhuma atenuação sonora, a menos que seja de aproximadamente 30 metros de profundidade, proporcionando de forma completa a obstrução visual do receptor, e, não apenas uma única linha de árvores ou arbustos entre a fonte e o ouvinte, mesmo que a vegetação bloqueie a linha de visão para a fonte.

Figura 4 – Condições significativas de atenuação sonora ao ar livre.



Fonte: Bistafa (2011).

As variáveis como temperatura e vento são gradientes que refratam (curvam) as trajetórias sonoras para cima e para baixo, produzindo áreas de “sombra acústica”, assim, alterando a interferência com o solo e alterando o desempenho das barreiras acústicas (BISTAFA, 2011). Segundo Bies e Hansen (2009), Licitra (2013) e Cowan (2016), a temperatura e a umidade relativa do ar são as principais condições que mais afetam a absorção sonora atmosférica. E, a maior variação nos níveis de som ao ar livre distantes de uma fonte sonora acontece devido ao efeito da refração atmosférica (COWAN, 2016).

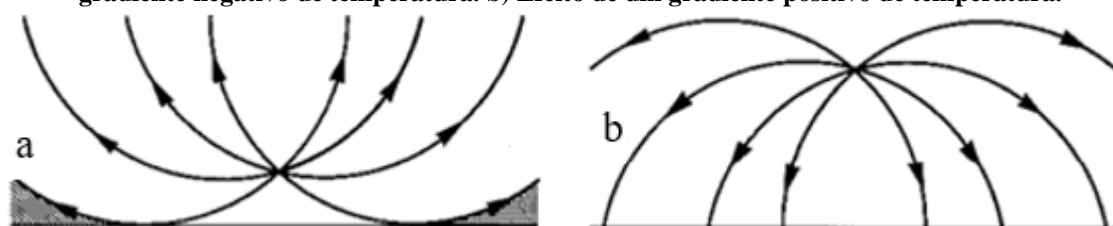
2.6.1 Gradientes de Temperatura

A velocidade de propagação sonora é proporcional à temperatura (LONG, 2006; BISTAFA, 2011). Portanto, em superfícies onde a temperatura é mais elevada, a velocidade do som também é superior, consequentemente, o som sofre influência da temperatura ao se propagar.

A Figura 5 mostra os gradientes de temperatura que são típicos de acontecer durante o período de 24 horas, efeito negativo e positivo. A Figura 5a, é um exemplo do efeito de um gradiente negativo, com os raios sonoros desviando para cima, assim, formando uma região de sombra acústica próxima ao solo. Essa situação é característica do período diurno, quando ocorre uma diminuição da temperatura com a altitude, e também, se intensifica ao final de um dia ensolarado, isto é, quando a insolação durante o dia provoca altas temperaturas, não só do solo, mas também do ar adjacente ao solo (BISTAFA, 2011).

O efeito de um gradiente positivo de temperatura (Figura 5b), com os raios sonoros desviando para baixo, é uma situação característica do período noturno, o que favorece a propagação sonora nas proximidades do solo, pois nesta situação causa a perda de calor por irradiação. Por meio desse fenômeno, explica-se a “melhor” propagação do nível sonoro, durante a noite, porque os raios se concentram no solo, ao contrário de serem desviados para cima (BISTAFA, 2011).

Figura 5 – Gradientes de temperatura e trajetórias dos raios sonoros a partir da fonte. a) Efeito de um gradiente negativo de temperatura. b) Efeito de um gradiente positivo de temperatura.

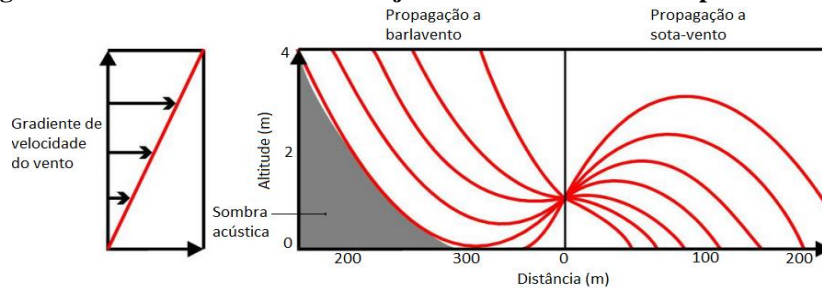


Fonte: Adaptado de Bistafa (2011).

2.6.2 Gradientes de Velocidade do Vento

Em concordância com a Figura 6, no momento em que a propagação sonora ocorre contra o vento (barlavento), a frente de onda curva-se para cima afastando o raio sonoro do solo, gerando uma zona de sombra acústica. Já no momento em que a propagação sonora ocorre a favor do vento (sota-vento), a frente da onda inclina-se para o solo, onde o raio sonoro passa a incidir (BISTAFA, 2011).

Figura 6 – Influência do vento na trajetória dos raios sonoros a partir da fonte.



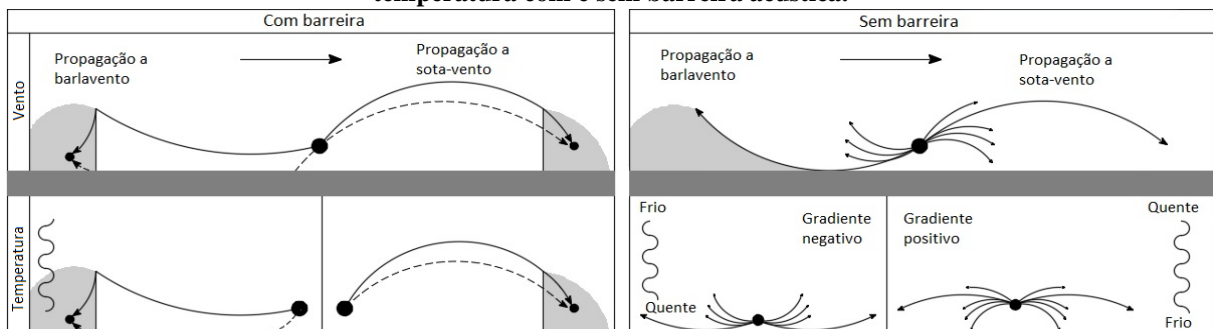
Fonte: Adaptado de Bistafa (2011).

2.6.3 Efeitos da Refração

Os efeitos da refração no percurso dos raios sonoros estão apresentados na Figura 7. Conforme sintetiza Bistafa (2011), os quadros que estão expostos à esquerda, mostram que a refração modifica a altura aparente da barreira acima da linha de visão. Os quadros que estão à direita, ilustram que a refração gera regiões de sombra e de aglomeração de raios sonoros.

Via de regra, quando o gradiente de temperatura é consideração negativo, ou ainda, quando a propagação sonora ocorre contra o vento (barlavento), produz o aumento da atenuação, ao passo que, quando o gradiente de temperatura é positivo, ou por sua vez, a propagação sonora ocorre a favor do vento, acontece redução de atenuação de barreiras acústicas, de solos macios e de áreas que possuem vegetação (BISTAFA, 2011).

Figura 7 – Efeitos da refração na trajetória dos raios sonoros, com e sem barreira acústica. Quadros superiores: vento com barreira acústica (linha sólida) e sem (linha tracejada). Quadros inferiores: temperatura com e sem barreira acústica.



Fonte: Adaptado de Kurze e Anderson, 1971; Bistafa (2011).

Para realizar medições acústicas confiáveis é necessário o entendimento dos efeitos provocados pela refração na propagação do ruído. O autor Bistafa (2001), enfatiza que, “o consultor não pode tirar vantagem da refração, realizando medições mais favoráveis à parte que ele representa”. No entanto, o autor sugere que as medições devem ser realizadas a barlavento (contra o vento), ou ao entardecer quando o dia for ensolarado. Para que o valor do nível sonoro equivalente (L_{eq}), seja mais significativo, as medições do ruído ambiental devem ser realizadas quando são mínimos os efeitos da refração, em dias sem ventos (BISTAFA, 2011).

2.7 O RUÍDO E SEUS EFEITOS NOCIVOS À SAÚDE HUMANA

Nos grandes centros urbanos o ruído é visto como uma variável que afeta muito a qualidade de vida, sendo comparado à poluição da água e do ar. Na Europa, uma pesquisa envolveu 75 cidades e mais da metade dos entrevistados subscreviam que o ruído urbano era um problema, com uma proporção que variava de 51% em Roterdã e Estrasburgo a 95% em Atenas (LICITRA, 2013).

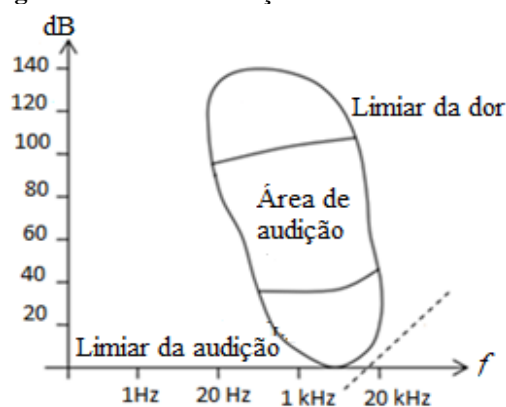
Estudos salientam uma correlação positiva entre a opinião sobre poluição atmosférica e sonora. E o impacto percebido do ruído no ambiente por causa do tráfego de veículos, não só parece ter influência na qualidade de vida de nossas cidades, mas também causam efeitos indesejáveis, já apontados anteriormente alguns sobressaem, como: perturbação do sono, perda de concentração, dificuldades de aprendizagem em escolas, aumento da pressão arterial (problemas cardiovasculares), ocorrência de AVC (acidente vascular cerebral), efeitos psicológicos e estresse (LICITRA, 2013).

Como um dos mecanismos mais importantes da nossa sobrevivência, o sentido da audição e a interpretação do som moldam o nosso mundo (COWAN, 2016). Para a audição humana, quanto à frequência, os sons audíveis estão limitados entre os valores de 20 Hz e 20.000 Hz, porém as sensibilidades variam dentro dessa faixa de frequência (EVEREST; POHLMANN, 2009; ESPINOZA, 2017).

Os sons com frequência inferior a 20 Hz são conhecidos como infrassons e, os sons com frequência superior a 20 kHz são denominados ultrassons (BISTAFA, 2011; COWAN, 2016). Em geral, ultra significa acima da faixa de percepção humana e infra significa abaixo da faixa de percepção humana (ESPINOZA, 2017). Os seres humanos são mais sensíveis a sons na faixa de 2.500 a 4.000Hz, devido à amplificação do canal auditivo, sendo também considerada a faixa de frequência crítica para a inteligibilidade da fala (EGAN, 2007; COWAN, 2016). Quanto maior a frequência, mais agudo será o som e vice-versa, logo a altura de som depende da frequência (BISTAFA, 2011).

Na acústica a percepção sobre frequência é essencial, pois está associada à repetição de um movimento que não é necessariamente senoidal, mesmo que a dependência senoidal seja importante devido às suas numerosas características. A Figura 8 ilustra as características da onda sonora referente à frequência no ar. Conforme o nível sonoro, dado em escala dB, as áreas compreendidas pela voz e música estão inclusas na área audível (BRUNEAU, 2006).

Figura 8 – Área de audição dos seres humanos.



Fonte: Bruneau (2006).

Entretanto, o ruído na maioria das vezes é um estressor ambiental supostamente com efeitos adversos sobre a saúde e bem-estar (KEMPEN; BABISCH, 2012). Embora, a exposição dos seres humanos a ruído ambiental seja uma preocupação global, grande parte das cidades ainda está sujeita a níveis de ruído que afetam e incomodam a população (SILVA et al., 2016).

Por volta de 1700 Bernardino Ramazzini, o “pai” da medicina ocupacional, declarou pela primeira vez a relação de causa e efeito entre a exposição a ruído ocupacional e os danos auditivos aos humanos (SIANO, 2012). Desde a Idade Média até a segunda metade do século XIX, o projeto e a estrutura das cidades quase não sofreram nenhuma mudança. Contudo, no início da Revolução Industrial, surgiu um processo de crescimento desordenado e descontrolado de centros urbanos (SIANO, 2012). Assim, resultando o que chamamos de ruído ambiental.

As pessoas começaram a migrar do campo para a cidade em busca de novos horizontes e melhor qualidade de vida. Isto causou não só um rápido crescimento da população e área urbana, mas também problemas derivados da falta de urbanização (SIANO, 2012). Assim, um dos problemas desta modernidade é o surgimento do ruído ambiental, o qual está associado às instalações de médias e grandes indústrias, diversas fábricas, aumento significativo da população urbana, tráfego intenso de veículos e transporte público, definitivamente, deteriorou profundamente a paisagem acústica das cidades.

Segundo Siano (2012), todas as fontes de ruído que afetam um determinado lugar são parte do ruído ambiental. Logo, suas interações resultam na expressão “paisagem acústica”, que é um termo da “identidade acústica” de um lugar em determinado momento. Todavia, o fluxo de veículos em cidades é geralmente considerado a principal fonte de ruído ambiental (MEDINA; MONTAÑO, 2010; SIANO, 2012). Observa-se que em média, a proporção de pessoas que apresentam incômodos significativos aumenta conforme os níveis de ruído de tráfego se tornam mais elevados (BLANCO; FLINDELL, 2011).

Portanto, os regulamentadores e os membros políticos precisam entender exatamente o que significa realmente a expressão “incômodos significativos”, porque sem esse conhecimento é difícil equilibrar os custos para implementar um sistema de gestão com o intuito de mitigar o ruído ao ar livre (BLANCO; FLINDELL, 2011).

A Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, estabelece:

Constitui parte de a política comunitária atingir um elevado nível de proteção da saúde e do ambiente, sendo a proteção contra o ruído um dos objetivos a atingir. No Livro Verde Sobre a Futura Política de Ruído, a Comissão identifica o ruído no meio ambiente como um dos principais problemas ambientais na Europa.

Preocupados com a qualidade ambiental sonora, a diretiva europeia recomenda estabelecer métodos de avaliação do ruído e definição dos valores-limite. Os Estados-Membros devem determinar os valores-limite, tendo a necessidade de aplicar o princípio da prevenção, com o intuito de preservar as zonas tranquilas das aglomerações (DIRECTIVA 2002/49/CE).

Nos Estados Unidos, a preocupação com problemas de ruído no local de trabalho e na qualidade de vida tem intensificado desde a alteração da *Walsh-Healy Act de 1969*. A partir deste ato foi elaborado o primeiro conjunto de regulamentos de ruído ocupacional em todo o país (*Occupational Safety and Health Administration*, 1983).

2.8 NORMAS E LEGISLAÇÕES REFERENTES AO RUÍDO AMBIENTAL NO BRASIL

A Organização Mundial de Saúde (OMS) publicou desde 1993 orientações para a proteção contra o ruído. Os níveis critérios recomendados foram com base em pesquisas realizadas em laboratório e em campo, sendo os resultados semelhantes aos estabelecidos pela EPA (*Environmental Protection Agency*). Esta agência de proteção ambiental dos Estados Unidos desde a década de 1970 recomenda níveis-critério interno e externo a edificações, tais níveis visam a proteção das atividades humanas, mais especificamente, a interferência na comunicação verbal, a exposição da comunidade ao ruído e a proteção contra perda de audição. Por exemplo, o nível-critério $L_{den} = 55$ dB externamente à edificação estabelecido pela EPA tem sido aplicado na legislação norte-americana, bem como em legislações de outros países (BISTAFA, 2011).

Visando ao conforto da comunidade a OMS (Organização Mundial de Saúde), recomenda nível-critério $L_{Aeq} = 50$ dB, para que a maioria das pessoas, de um modo geral, não se sinta moderadamente incomodada pelo ruído. E, em áreas habitadas a OMS recomenda nível-

critério $L_{Aeq} = 55$ dB para o período diurno, este nível considera que a maioria das pessoas não sejam severamente incomodada pelo ruído. Para o período noturno em áreas habitadas, a OMS recomenda nível-critério $L_{Aeq} = 45$ dB, tendo a preocupação em sugerir para que o nível de 30 dB no interior de ambientes de descanso, não ultrapassem com as janelas abertas (BISTAFA, 2011).

No Brasil, ainda de forma sucinta, têm-se normas, legislações e resoluções aplicáveis ao controle de ruído ambiental, assim como, até mesmo normas específicas referentes à exposição ao ruído ocupacional. Embora, a carência de métodos e critérios específicos para avaliar ruído em comunidades não tem impedido a elaboração de relatórios referentes ao ruído, pois a análise pode ser realizada com base em legislações e experiências de outros países (BISTAFA, 2011).

2.8.1 Resolução do Conselho Nacional e do Meio Ambiente (CONAMA)

A Resolução CONAMA nº 001 de 1990, referente ao controle da poluição sonora no Brasil, dispõe sobre critérios e padrões de emissões de níveis de ruídos que agrava os grandes centros urbanos, tendo a preocupação em minimizar os níveis elevados de ruído que interferem na qualidade de vida da comunidade. Assim, esta Resolução, trata-se de limitar a emissão de ruídos em decorrência de quaisquer atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, no benefício da saúde e do sossego público.

A Resolução não menciona o ruído de tráfego veicular, assim como ferroviário e aéreo, destacando apenas que a emissão de ruídos produzidos por veículos automotores obedecerá à norma expedida pelo Conselho Nacional de Trânsito – CONTRAN. A Resolução ainda destaca que as normas regulamentadoras sobre poluição sonora, emitidas a partir da data da Resolução, deverão ser compatibilizadas com a Resolução nº 001 do CONAMA.

A resolução CONAMA nº 252 de 01/02/1999 considera que o ruído excessivo, especialmente, o ruído oriundo de tráfego de veículos rodoviários automotores, causa danos à saúde física e mental, afetando particularmente a audição, sendo necessário redução dos elevados índices de poluição sonora nos principais centros urbanos do Brasil (RODRIGUES, 2010).

2.8.2 Norma ABNT NBR 10151:2000

A norma Brasileira Registrada relacionada ao ruído ambiental que tem como objetivo estabelecer níveis sonoros considerados aceitáveis para ambientes externos, ar livre, é a NBR 10151:2000 (Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento).

A norma NBR 10151:2000 define algumas exigências, como por exemplo, a avaliação da aceitabilidade do ruído é independente da existência de reclamações, também específica a medição do nível de pressão sonora equivalente (L_{Aeq}) A-ponderado, que deve ser corrigido com a soma de 5 dB quando o ruído apresentar características impulsivas ou de impacto, e acrescido de 5 dB quando o ruído tiver componentes tonais. Quanto ao limite de horário para a avaliação do ruído, a norma estabelece que o período noturno não deve começar depois das 22 horas e não deve terminar antes das 7 horas do dia seguinte.

De modo geral, o método de avaliação de ruído recomendado pela NBR 10151:2000, embasa-se em uma comparação entre o nível de pressão sonora corrigido (L_c) e o nível de critério de avaliação (NCA), estabelecidos conforme a Tabela 1.

Tabela 1 – Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB.

Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospital 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: BRASIL. Lei nº 10151, junho de 2000.

Observa-se que já são quase duas décadas que os limites de aceitabilidade de níveis de ruído urbano foram estabelecidos pela norma Brasileira Registrada (ASSOCIAÇÃO..., 2000). E, a redução e controle da poluição sonora, tornou-se um grande desafio para a política pública brasileira quanto a formulação de legislação referente à avaliação e gestão de ruído ambiental, em virtude da expansão urbana nos últimos anos.

2.8.3 Lei Municipal de Curitiba 10625:2002

A Secretaria Municipal do Meio Ambiente do Município de Curitiba, Paraná, publicou em 19 de dezembro de 2002, a Lei nº. 10625, a qual dispõe sobre ruídos urbanos, proteção do bem-estar e do sossego público. Os limites sonoros estabelecidos nesta lei são fundamentados a partir da NBR 10151:2000, em conformidade com os limites sonoros estabelecidos pela

Organização Mundial de Saúde (OMS). A Lei nº. 10625:2002, em seu artigo 2º, define poluição sonora com sendo “emissão de som ou ruído que seja, direta ou indiretamente, ofensivo ou nocivo à saúde, à segurança e ao bem-estar da coletividade”.

E, em seu artigo 5º. Parágrafo 3º. a Lei Municipal estabelece:

Quando a propriedade que sofre o incômodo tratar-se de escola, creche, biblioteca pública, hospital, ambulatório, casa de saúde ou similar com leitos para internamento, hotel ou similar, devem ser atendidos os limites estabelecidos para ZR-1², independentemente da zona de uso e deve ser observado o raio de 200m (duzentos metros) de distância, definida como zona de silêncio.

A Lei Municipal de Curitiba, estabelece por zoneamento os níveis de pressão sonora máximos. As informações sobre zoneamento urbano, assim como os seus respectivos limites máximos de níveis de pressão sonora, conforme os períodos diurno, vespertino e noturno, encontram-se no Anexo I da Lei, de acordo com o Quadro 2.

Quadro 2 – Níveis de pressão sonora máximos, conforme a Lei Municipal de Curitiba nº. 10625:2002.

ZONAS DE USO	DIURNO das 07h01 às 19h00	VESPERTINO das 19h01 às 22h00	NOTURNO das 22h01 às 07h00
ZR-1, ZR2, ZR-3, ZR-B, ZR-AV, ZR-M, APA-SARU, APA-SMRU	55 dB	50 dB	45 dB
ZR-OC, ZR-SF, ZR-U, ZR-P, ZT-MF, ZT-NC, ZE-E, ZE-M, Z-COM, SE-CC, SE-OS, SE-OI, APA-ST	60 dB	55 dB	50 dB
ZR-4, ZC, ZT-BR116, ZUM, ZE-D, SH, SE-BR116, SE-MF, SE-CF, SE-WB, SE-AC, SE-CB, CONEC, SE-PE, SC-SF, SC-UM, SE-NC, SEI, SEHIS, SE-LE, APA-SS Vias prioritárias 1 e 2, Vias setoriais, Vias coletoras 1, 2 e 3	65 dB	60 dB	55 dB
ZS-1, ZS-2, ZES, ZI, APA-SUE	70 dB	60 dB	60 dB

Os casos não contemplados neste Quadro, serão objeto de análise específica por parte da Secretaria Municipal do Meio Ambiente

Legenda:

APA-SARU Setor de Alta Restrição de Uso; **APA-SMRU** Setor de Média Restrição de Uso; **APA-ST** Setor de Transição; **APA-SUE** Setor de Uso Esportivo; **APA-SS** Setor de Serviço; **CONEC** Setor Especial Conector – Conectora 1,2,3,4; **SC-SF** Setor Especial Comercial Santa Felicidade; **SC-UM** Setor Especial Comercial Umbará; **SE** Setor Especial Estrutural; **SE-AC** Setor Especial da Av. Affonso Camargo; **SE-BR-116** Setor Especial da BR-116; **SE-CB** Setor Especial da Rua Engenheiro Costa Barros; **SE-CC** Setor Especial Centro Cívico; **SE-CF** Setor Especial da Av. Comendador Franco; **SEHIS** Setor Especial Habitação de Interesse Social; **SEI** Setor Especial Institucional; **SE-LE** Setor Especial Linhão do Emprego; **SE-MF** Setor Especial da Av. Mal. Floriano Peixoto; **SE-NC** Setor Especial Nova Curitiba; **SE-OI** Setor Especial de Ocupação Integrada; **SE-PE** Setor Especial Preferencial de Pedestres; **SE-PS** Setor Especial do Pólo de Software; **SE-WB** Setor Especial da Av. Pres. Wenceslau Braz SH Setor Histórico; **ZC** Zona Central; **Z-CON** Zona de Contenção; **ZE-D** Zona Especial Desportiva; **ZE-E** Zona Especial Educacional; **ZE-M** Zona Especial Militar; **ZES** Zona Especial de Serviços; **ZI** Zona Industrial; **ZR-1** Zona Residencial 1; **ZR-2** Zona Residencial 2; **ZR-3** Zona Residencial 3; **ZR-4** Zona Residencial 4; **ZR-AV** Zona Residencial Alto da Glória; **ZR-B** Zona Residencial Batel; **ZR-M** Zona Residencial Mercês; **ZR-OC** Zona Residencial de Ocupação Controlada; **ZR-P** Zona Residencial Passaúna; **ZR-SF** Zona Residencial Santa Felicidade; **ZR-U** Zona Residencial Umbará; **ZS-1** Zona de Serviço 1; **ZS-2** Zona de Serviço 2; **ZT-BR-116** Zona de Transição BR – 116; **ZT-MF** Zona de Transição Av. Mal. Floriano Peixoto; **ZT-NC** Zona de Transição Nova Curitiba; **Z-UM** Zona de Uso Misto.

Fonte: Curitiba, 2002.

² ZR-1 Zona Residencial 1.

É evidente que o Brasil tem muito a aprender com os países da Europa sobre as políticas de controle de ruído e sua implementação, uma vez que suas políticas relativas à avaliação e gestão do ruído ambiental oferecem normas, diretivas, legislações, e ainda, uma comissão integrante do Livro Verde Sobre a Futura Política de ruído, a qual identifica o ruído no meio ambiente como sendo um dos principais problemas ambientais na Europa. Pois, a poluição sonora ambiental é reconhecida como um sério problema que está sendo enfrentado com crescente seriedade em diversos países da Europa Continental (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

2.8.4 Norma Regulamentadora nº. 15

A exposição que um indivíduo permanece exposto ao ruído é tão importante de ser considerada quanto aos níveis de ruído existentes, seja ruído intermitente, contínuo ou de impacto. Para tanto, a Portaria 3214:1978 da Consolidação das Leis Trabalhistas (CLT, 1978) recomenda por meio da norma NR-15 – Atividades e Operações Insalubres (Tabela 2), os limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente sem riscos de danos à saúde do trabalhador sem que seja necessário o uso de equipamento de proteção individual (BRASIL, 2019).

Tabela 2 – Limites de tolerância para ruído contínuo ou intermitente.

Nível de Ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 40 minutos
94	2 horas e 15 minutos
95	2 horas
96	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

Fonte: BRASIL, 2019.

A norma regulamentadora NR-15 relata que a exposição a ruído acima de 85 dB sem o uso de proteção resulta em danos à audição do trabalhador e níveis de ruído acima de 115 dB é proibido quando não estejam adequadamente protegidos. A norma também destaca que quando a jornada de trabalho ocorrer em dois ou mais períodos de exposição a ruído de diferentes níveis, devem ser considerados os seus efeitos combinados, a fim de não exceder a dose diária de ruído (D), ou seja, não exceder o valor 1 (um), calculada por meio da Equação 4, caso contrário a exposição estará acima do limite de tolerância (BRASIL, 2019).

$$D = \frac{C1}{T1} + \frac{C2}{T2} + \frac{C3}{T3} \dots + \frac{Cn}{Tn} \quad (4)$$

onde:

D = Dose diária de ruído;

Cn = Indica tempo total de exposição a um nível específico;

Tn = Indica a máxima exposição diária permissível.

2.9 CONTROLE DE RUÍDO AMBIENTAL

A falta de um sistema de controle de ruído adequado em escritórios, salas de aula e apartamentos pode interferir no desempenho das atividades rotineiras das pessoas. Mesmo que o ruído não seja reconhecido como nocivo e não seja principalmente irritante, se o ser humano não puder se comunicar efetivamente, o ruído é indesejável (BARRON, 2003). Muito pode ser feito para limitar a gravidade dos problemas provocados pelo ruído, embora, não é tão simples.

Os autores Bies e Hansen (2009) e Bistafa (2011), enfatizam que qualquer problema de ruído pode ser descrito em termos de uma fonte sonora, um caminho de transmissão e um receptor, e, o controle de ruído pode assumir técnicas para alterar qualquer um ou todos esses elementos.

Como já apresentado anteriormente, as fontes sonoras incluem o tráfego (aéreo rodoviário e ferroviário), instalações industriais, atividades domésticas, dentre outras. A trajetória de transmissão engloba o ar, as paredes, muros, barreiras artificiais e naturais, solo etc. E o ser humano normalmente é o receptor. Uma comunidade que está próxima a instalações industriais ou rodovia, é vista como sendo um receptor exposto a um problema de poluição sonora ambiental (BIES; HANSEN, 2009; BISTAFA, 2011).

É mais econômico implementar o controle de ruído no estágio de concepção de projeto do que esperar por reclamações sobre uma instalação ou produto acabado (BIES; HANSEN, 2009). Porém, o controle normalmente incide sobre a trajetória de transmissão, onde são

comuns buscar soluções como tratamento de absorção sonora, silenciadores, enclausuramento da fonte e construções de barreiras acústicas. No receptor, geralmente a atenuação é viável ser aplicada no local de trabalho com a utilização de equipamento de proteção individual (BISTAFA, 2011).

Quando o controle de ruído envolve a compreensão do mecanismo de produção de poluição sonora ambiental, normalmente, uma implementação comum para a atenuação assume a forma de barreira acústica, em algumas situações, essa pode ser a única solução prática (BIES; HANSEN, 2009). Na maioria dos casos não é possível eliminar todo o ruído indesejado, até porque é muito oneroso, no entanto, os níveis sonoros que constituem o critério de aceitabilidade devem ser gerenciados. Assim sendo, os níveis excessivos de ruído podem ser quantificados/estimados por medidas e procedimentos adequados (BIES; HANSEN, 2009).

Para qualquer programa destinado ao controle de ruído é preciso estabelecer métodos pertinentes para a determinação de uma solução aceitável para o problema. Pois, métodos fornecem os meios para estimar quanta redução sonora é necessária (BIES; HANSEN, 2009). E, um meio eficaz de quantificar os níveis sonoros é o mapeamento de ruído ambiental, sendo um instrumento para auxiliar na avaliação, no controle e no monitoramento de ruído.

2.10 MAPA DE RUÍDO AMBIENTAL: FERRAMENTA DE GESTÃO URBANA

Nas últimas décadas, umas das mais relevantes aplicações é a elaboração de mapa de ruído voltado ao desenvolvimento de planos estratégicos para a gestão acústica. Por meio de mapeamento de ruído podem ser realizados não só o diagnóstico do incômodo, mas também dos riscos à saúde (GONZÁLEZ, 2011; SIANO, 2012). Um mapa de ruído é uma ferramenta de gestão para a avaliação global da exposição ao ruído em uma área devido à existência de diferentes fontes de ruído ou para fazer previsões globais para a área de interesse.

Dada importância ao tema, a Diretiva Europeia de 2002/49/CE, relativa ao ruído ambiental solicitou aos Estados-Membros da União, que elaborassem planos de ação relativos ao ruído para um número limitado de aglomerações, com mais de 250.000 habitantes, e as rodovias principais, com mais de 6 milhões de veículos por ano, e os grandes eixos ferroviários com mais de 60.000 trens por ano, e os grandes aeroportos com movimentos de aeronaves (LICITRA, 2013).

Segundo Licitra (2013), há alguns bons motivos práticos para mapear o ruído ambiental:

- Obter dados quantitativos e qualitativos para dar suporte ao desenvolvimento de planejamento e gestão à qualidade ambiental sonora;

- Verificação da precisão e qualidade das conclusões antecipadas para estudos de avaliação do impacto ambiental que possa gerar com a implementação de novas infraestruturas de transporte, novas instalações industriais e, também, novas áreas tranquilas;
- Verificar as implicações de decisões potenciais ou empregadas na gestão de ruído, comparando situações de ruído “antes e depois”;
- Analisar a eficácia global das medidas contra o ruído ambiental;
- Controlar a situação ambiental sonora, tal controle requer um processo de *feedback*;
- O mapeamento de ruído é uma maneira de fornecer informações às comunidades sobre poluição sonora;
- O mapa e o controle do ruído ambiental também podem ser utilizados para entender as variáveis que cercam o problema de ruído, bem como para verificar as tendências futuras de ruído, a fim de antecipar medidas preventivas contra o problema sonoro.

A Agência Portuguesa do Ambiente (2011), publicou diretrizes para elaboração de mapas de ruído. Algumas definições relevantes ao desenvolvimento de mapas de ruídos estão descritas na APA (Agência Portuguesa do Ambiente), a saber:

Mapa de Ruído ambiental: É uma representação geográfica do ruído exterior. Onde são apresentados dados quantitativos e qualitativos sobre uma situação real de ruído existente ou prevista em termos de um indicador de ruído, onde se representam as áreas (área de estudo ou área do mapa) e os contornos das zonas de ruído às quais corresponde uma determinada classe de valores expressos em dB. Tais valores são calculados em uma malha quadrada de pontos e a uma certa altura em referência ao solo (especificamente 1,5 ou 4 metros);

Área de Estudo: É uma área que, em geral, é superior à área do mapa, onde poderão existir fontes de ruído que, apesar de se localizarem fora da área do mapa, poderão ter influência nos níveis sonoros existentes.

Área do Mapa: Área onde se pretende conhecer os níveis sonoros, valores expressos em L_{Aeq} , dB.

Intervalos de Tempo de Referência: São entendidos como períodos de referência, como por exemplo: diurno (7h às 20h), entardecer (20h às 23h) e noturno (23h às 7h).

De acordo com a Diretiva 2002/49/CE, os mapas de ruído constituem um primeiro passo importante para desenvolver medidas eficazes e sustentáveis de atenuação do ruído e para diminuir a exposição nas proximidades das fontes de tráfego. Pode-se, também, elaborar mapas

estratégicos ou pontuais, apenas para mostrar as áreas onde medidas de redução de ruído devem ser planejadas e executadas com prioridade (LICITRA, 2013).

Para estudos realizados no Brasil, pode-se ter como modelo o trabalho da Comissão da União Europeia (UE), que desde 2002 foi integrado pela pesquisa produzida pelo Grupo de Trabalho de Avaliação da Exposição ao Ruído (WG-AEN) e Saúde e Aspectos Socioeconômicos (WG-HSEA), e no contexto de projetos relevantes financiados pela UE, que apontaram as melhores práticas e diretrizes a serem compartilhadas entre a comunidade.

Entretanto, a primeira rodada de mapeamento de ruído ambiental, em 2007, e de planejamento de ações, em 2008, enfatizou os limites dos mapas de ruído como ferramentas de planejamento e gestão para o controle da poluição sonora. Descobriu-se que, como a precisão dos algoritmos preditivos (dentro do *software* comercial) depende da qualidade dos dados de entrada (parâmetros de entrada), os mapas de ruído podem ter uma incerteza local tão grande quanto a 5 dB.

2.11 BARREIRA ACÚSTICA

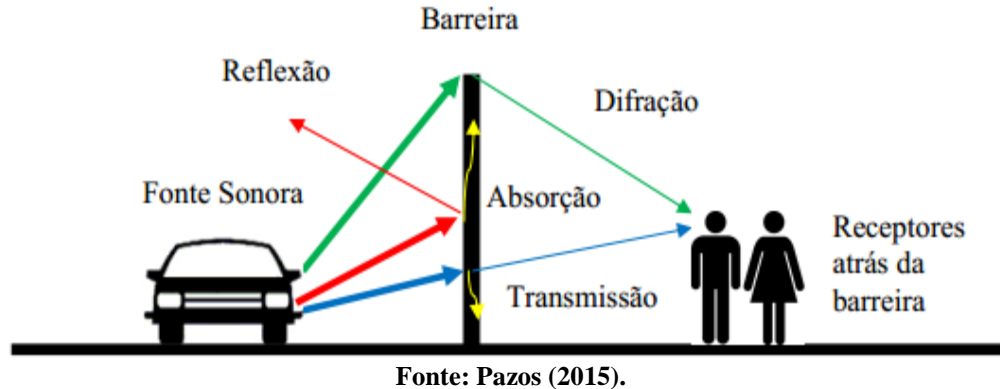
Barreiras acústicas são estruturas ou obstáculos instalados entre a fonte o receptor com o intuito de mitigar os níveis sonoros. Quando, trata-se de controlar o ruído externo as barreiras são a maneira mais comumente utilizadas (LONG, 2006). Esta forma de atenuar o ruído em localidades urbanas e semiurbanas teve um crescimento significativo em toda a Europa, Estados Unidos e Austrália, retratando a consciência do público em geral com os efeitos nocivos da poluição sonora (KOTZEN; ENGLISH, 2009). Os autores ainda afirmam que, a demanda por um ambiente mais silencioso fez com que o mercado de barreiras acústicas crescesse consideravelmente nos últimos anos em toda a Europa.

Na maioria das vezes são construídas barreiras acústicas que proporcionam pouca ou nenhuma proteção às comunidades que se destinam a servir. Existem outras que, com um pouco mais de cuidado na concepção do projeto, pode proporcionar significativamente melhor desempenho acústico. Para evitar esses erros, que geram custos, e garantir que maiores benefícios possíveis sejam obtidos a partir de cada barreira, é essencial para os projetistas, engenheiros e arquitetos compreender os princípios básicos da teoria da barreira acústica (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Assim como a propagação sonora depende de variáveis relevantes quanto à atenuação sonora, o desempenho acústico de barreiras depende de quatro efeitos importantes, conforme ilustra a Figura 9. São a difração sonora nas bordas, a transmissão sonora, a absorção do material

ou dissipação de energia pelo material constituinte e a reflexão acústica da superfície (LONG, 2006; PAZOS, 2015).

Figura 9 – Efeitos de atenuação relacionados a barreiras acústicas, representados pelos caminhos da onda sonora difratada, transmitida e refletida e pela dissipação de energia absorvida pela barreira.

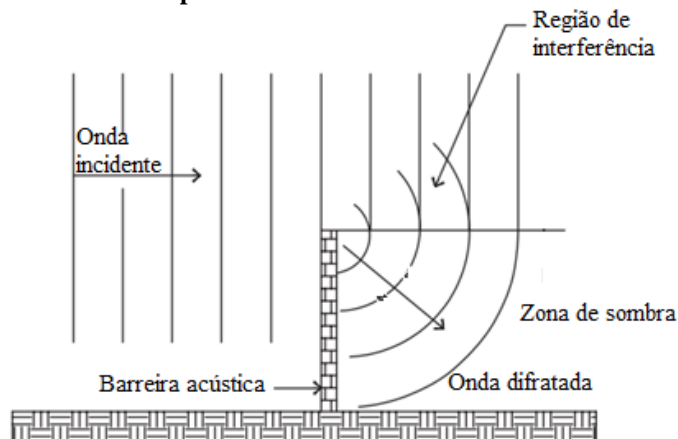


2.11.1 Difração sonora

A difração ocorre quando uma onda sonora encontra uma barreira ou um obstáculo sólido com e sem abertura. Alguma energia sonora será reduzida, mas a maioria irá se curvar ao redor do obstáculo. Há um limite para a capacidade de redução de ruído de uma barreira acústica devido à difração e esse limite é independente da composição. A Figura 10 apresenta uma simplificação da eficácia da redução de ruído de uma barreira típica (COWAN, 2016).

Aplicando a analogia da luz, a região com a maior redução sonora é conhecida como zona de sombra. Os efeitos de difração ocorrem apenas dentro de 100 metros de uma barreira, supondo que o obstáculo esteja a menos de 30 metros da fonte sonora de interesse, e os maiores efeitos estão próximos à barreira. Além dessas distâncias, os efeitos de difração são mínimos. O parâmetro chave para a redução de ruído devido à difração é quebrar a linha de visão entre a fonte e o ouvinte (LONG, 2006; COWAN, 2016).

Figura 10 – Geometria simplificada de uma barreira mostrando a difração sonora.



Segundo Bistafa (2011), quando em barreiras longas o nível sonoro atinge o topo, o mesmo é curvado por difração para baixo, a partir da chamada zona de *Fresnel*, localizada no topo, gerando a sombra acústica atrás da barreira. Logo, o som que atinge a zona de sombra tem seu nível reduzido por difração. Embora, como relatam Kotzen e English (2009), os raios que incidem o topo da barreira ou as demais extremidades e atingem o receptor pelo fenômeno de difração, são considerados os raios sonoros mais difíceis de interceptação. Para Long (2006), obtêm-se maior atenuação por barreira acústica, quanto maior for o ângulo difração.

Em relação ao melhor desempenho acústico de uma barreira, é geralmente desejável construí-la o mais próximo possível da rodovia (KOTZEN; ENGLISH, 2009). Isto aplica-se quando a fonte sonora e o receptor estão nivelados, ou quando a fonte sonora está mais elevada conforme ilustra a Figura 11.

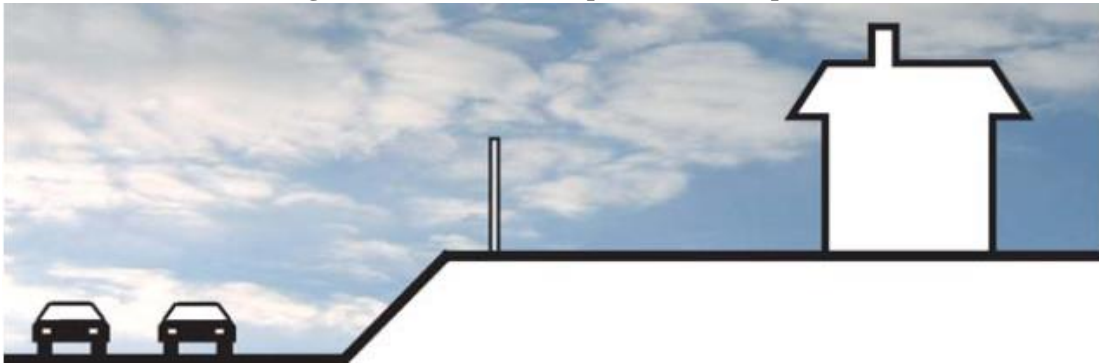
Figura 11 – Barreira mais próxima à fonte sonora.



Fonte: Adaptado de Kotzen e English (2009).

Contudo, a barreira acústica pode ser construída próxima ao receptor, sendo este um método menos usual, válido somente em caso específico conforme mostra a Figura 12, onde a barreira encontra-se no topo da elevação e a fonte sonora encontra-se abaixo do nível do receptor (KOTZEN; ENGLISH, 2009). Os autores lembram, que neste caso é comum ter incompatibilidade entre a eficiência acústica e paisagem sonora, ao passo que a paisagem pode ser comprometida, mesmo de forma parcial, pela barreira acústica, o que pode ser evitado se for construída em material transparente.

Figura 12 – Barreira mais próxima ao receptor.

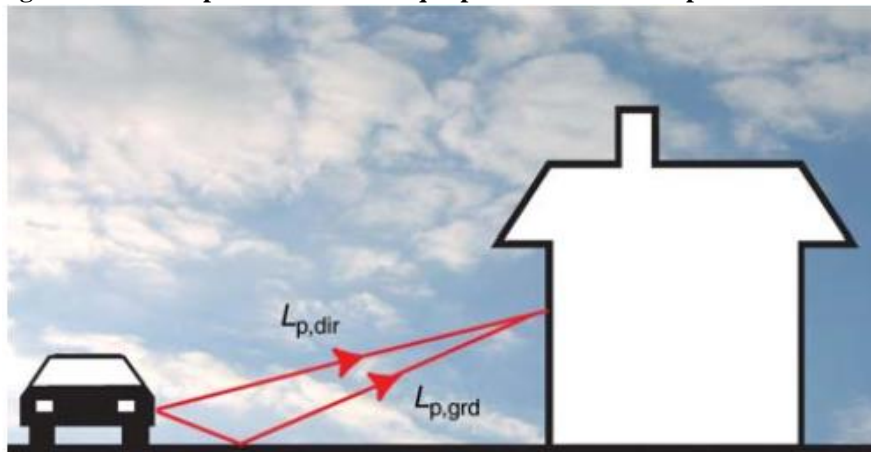


Fonte: Adaptado de Kotzen e English (2009).

2.11.2 Transmissão sonora

Segundo os autores Kotzen e English (2009), o caminho de transmissão do nível sonoro mais importante é o raio que viaja diretamente entre a rodovia e o receptor, conhecido como o som direto ($L_{p,dir}$). Outro raio que alcançará o receptor é o raio que atinge o solo e é refletido para cima, ($L_{p,grd}$), conforme Figura 13. Estes são os principais raios sonoros que podem ser contidos por uma barreira acústica, com o intuito de proteger uma área sensível a ruído.

Figura 13 – Principais raios sonoros que podem ser contidos por uma barreira.

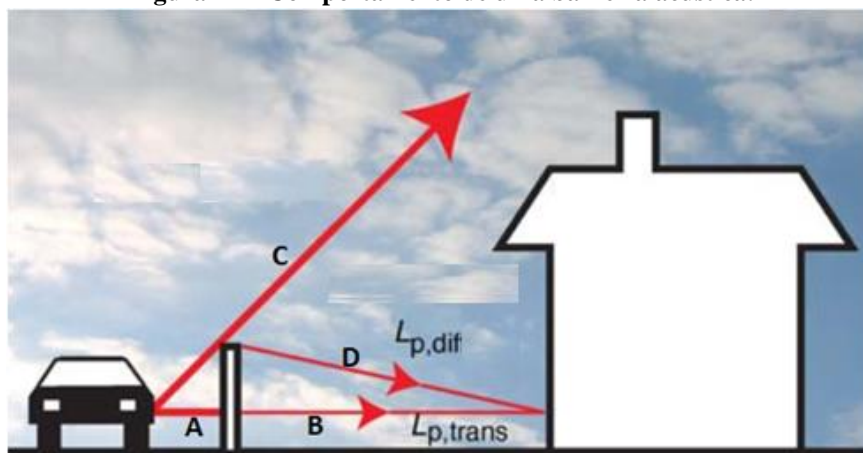


Fonte: Kotzen e English (2009).

A introdução de uma barreira acústica entre a fonte sonora e o receptor (Figura 14) pode reduzir consideravelmente a força dos raios diretos por sofrerem alterações condicionadas pelo limite vertical da barreira. Pois uma porcentagem desses raios é refletida de volta à fonte (A), outra porcentagem é transmitida para o outro lado da barreira (B), e, a parte que não afetaria o receptor por incidir na borda superior da barreira é o fenômeno da difração (C), os raios importantes são aqueles difratados para baixo da borda superior da barreira (D), evidente que com intensidade bem menor, porém, muito relevante para o bom desempenho acústico da

barreira. A presença desse obstáculo também elimina o $L_{p,grd}$ como um caminho significativo de transmissão de som (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Figura 14 – Comportamento de uma barreira acústica.



Fonte: Adaptado de Kotzen e English (2009).

2.11.3 Absorção sonora do material

A absorção sonora é tipicamente descrita em termos de um coeficiente de absorção sem unidade, α , que é a razão entre a energia sonora absorvida pelo material e a energia incidente. Os coeficientes de absorção variam de 0 a 1, com 0 implicando ausência de absorção (ou reflexão total) e 1 implicando absorção total (ou nenhuma reflexão). Estes são os limites ideais, uma vez que alguma energia é sempre absorvida e alguns são sempre refletidos. Materiais porosos são absorventes e materiais densos e lisos são altamente refletivos (COWAN, 2016). Conforme expõe Bistafa (2011), os materiais absorventes são leves e, por sua vez, não tem características estruturais.

Os valores dos coeficientes de absorção sonora (α) variam de acordo com a frequência, aumentando mais normalmente com a frequência crescente para materiais porosos e fibrosos, como fibra de vidro, lã de rocha e espumas de poliuretano. Pode-se considerar também que, o coeficiente (α) aumenta conforme a espessura e a densidade dos materiais fibrosos e porosos (BISTAFA, 2011; COWAN, 2016).

Existe um parâmetro padrão de valor único que é usado com mais frequência para descrever a capacidade de absorção sonora do material na faixa de frequência de fala humana, refere-se ao coeficiente de redução de ruído (*Noise Reduction Coefficient* – NRC), que é a média aritmética dos coeficientes de absorção das bandas de oitava de 250 a 2.000 Hz (LONG, 2006; EGAN, 2007; BISTAFA, 2011; COWAN, 2016). De acordo com os autores Bozkurt e

Demirkale (2019), o coeficiente de redução de ruído (NRC), estabelecido nas normas ASTM C423-17 e ASTM C634-13, tem sido amplamente utilizado na literatura.

Embora a métrica de número único (NRC), seja útil para obter uma ideia geral da eficácia de um material específico, para uma análise mais criteriosa, deve-se realizar todo o intervalo de frequência de interesse (LONG, 2006). Segue o exemplo para o cálculo do NRC, Equação 5.

$$NRC = \frac{1}{4}[\alpha(250) + \alpha(500) + \alpha(1000) + \alpha(2000)] \quad (5)$$

onde:

$\alpha(250)$ = coeficiente de absorção sonora de 250 Hz;

$\alpha(500)$ = coeficiente de absorção sonora de 500 Hz;

$\alpha(1000)$ = coeficiente de absorção sonora de 1000 Hz;

$\alpha(2000)$ = coeficiente de absorção sonora de 2000 Hz;

Os valores para o índice de absorção sonora menores que $\alpha = 0,2$ são normalmente considerados reflexivos e valores maiores que $\alpha = 0,7$ são geralmente considerados absorventes. Em geral, superfícies refletoras rígidas, tais como gesso pintado e mármore, têm índices de absorção menor que $\alpha = 0,05$ e superfícies absorventes porosas, como fibra de vidro e terra solta, têm índices de absorção maior que $\alpha = 0,80$. Embora possa encontrar em diversas publicações dados sobre os valores de absorção sonora para diferentes materiais, é necessário primeiramente utilizar os coeficientes de absorção publicados por fabricantes dos produtos, principalmente, os que tenham sido medidos usando os métodos estabelecidos por ISO ou ASTM (COWAN, 2016).

Para barreiras acústicas existem duas classes principais de mecanismos de absorção sonora que são utilizadas. A maioria das barreiras absorptivas incorpora uma camada permeável de material que está voltada para o ruído incidente. A resistividade de fluxo deste material poroso faz com que a energia acústica das ondas sonoras seja dissipada dentro do material e eventualmente transformada em energia térmica. A segunda classe de absorvedor é baseada no princípio do ressonador de *Helmholtz*, pelo fato de que a onda sonora incidente entra numa série de cavidades na barreira por meio de pequenos furos ou ranhuras estreitas (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

As barreiras com painéis fabricados ou com de material poroso, tal como fibra mineral ou espuma, com o lado voltado para o tráfego, são classificadas como barreiras de absorção, uma vez que estas podem absorver a maioria do som incidente, sendo apenas uma proporção relativamente pequena refletido (KOTZEN; ENGLISH, 2009). A Figura 15 mostra como o

revestimento de uma barreira acústica com material absorvente de som reduz consideravelmente o ruído refletido gerado pelo ruído de tráfego.

Figura 15 – Barreira acústica com material absorvente de ruído.



Fonte: Kotzen e English (2009).

A absorção é útil para minimizar reflexões, não somente em um ambiente fechado, mas também pode ser útil ao ar livre, quando uma superfície refletora grande está localizada próxima a uma fonte de ruído elevado (COWAN, 2016).

2.11.4 Dados de absorção sonora do bloco de concreto convencional

Quando se busca na literatura tabela de coeficiente de absorção sonora (α), e do coeficiente de redução sonora (*Noise Reduction Coefficient* – NRC), de bloco de concreto não pintado, encontra-se dados de coeficientes em bandas de oitava das frequências 125 Hz a 4000 Hz, e do NRC, uma média do intervalo de frequências sonoras de 250 Hz a 2000 Hz, conforme especificado na Tabela 3.

Tabela 3 – Coeficientes de absorção sonora de bloco de concreto não pintado publicados na literatura.

Autores	Ano/Página	Literatura (Livros)	Coeficiente de absorção sonora do bloco de concreto convencional não pintado						
			Frequência em bandas de oitava [Hz]						
			125	250	500	1000	2000	4000	NRC
Randall F. Barron	2003/P. 521	<i>Industrial Noise Control and Acoustics</i>	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	-
Lawrence K. Wang et al.	2005/P. 235	<i>Advanced Air and Noise Pollution Control</i>	-	-	-	-	-	-	0,36
Marshall Long	2006/P. 257	<i>Architectural Acoustics</i>	0,36	0,44	0,51	0,29	0,39	0,25	-
David Egan	2007/P. 52	<i>Architectural Acoustics</i>	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	0,35
F. Alton Everest; Ken C. Pohlmann	2009/P. 481	<i>Master Handbook of Acoustics</i>	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	-
Tyler Adams	2017/P. 282	<i>Sound Materials: A Compendium of Sound Absorbing Materials for Architecture</i>	0,36	0,44	0,31	0,29	0,39	0,25	0,35

Fonte: Dados da literatura (2019).

Os valores de coeficientes de absorção sonora publicados na literatura, para comparação com o material estudado nesta tese, bloco de concreto de resíduos da construção. O autor Egan (2007) destaca que a referência de teste de absorção do material é descrita pela norma americana (*American Society of Testing Materials – ASTM C 423*).

2.11.5 Reflexão sonora

Reflexão é o retorno de uma onda sonora de uma superfície, nesse caso, o ângulo de incidência será igual ao ângulo de reflexão (EGAN, 2007). Ao ar livre, têm-se os exemplos de painéis de barreiras fabricados a partir de materiais sólidos homogêneos, tais como concreto ou madeira, que podem ser considerados como sendo acusticamente reflexivos, uma vez que a maior parte da energia sonora incidente será refletida.

A teoria de barreira acústica descrita por Kotzen e English (2009), mostra que a construção de uma simples barreira pode reduzir significativamente o raio direto (L_p , dir) entre a fonte sonora e o receptor. Ao passo que, a energia sonora que diminuiu sobre a barreira acústica será refletida ou absorvida, tendo apenas uma pequena proporção transmitida através da barreira (KOTZEN; ENGLISH, 2009). O raio refletido pode ser considerado como tendo origem numa fonte imagem, localizada à mesma distância entre a fonte e a barreira, mas do lado oposto da barreira (Figura 16).

Figura 16 – Modelo de fonte imagem para o som refletido (fonte imagem e fonte real).



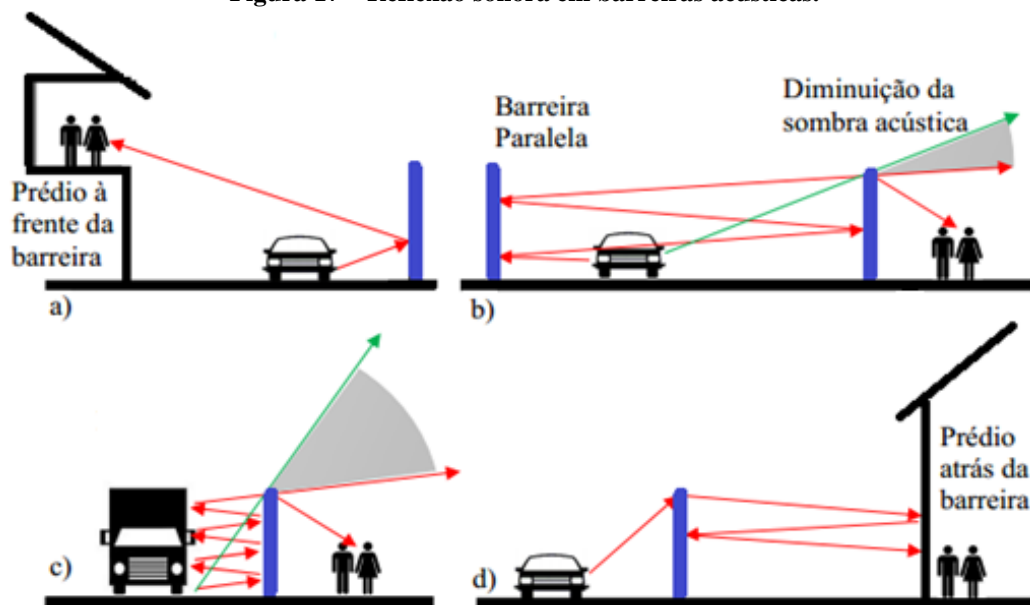
Fonte: Kotzen e English (2009).

O autor Pazos (2015), exemplifica a partir de quatro situações específicas as reflexões sonoras que podem ocorrer em superfícies externas de barreiras acústicas. A primeira refere-se às reflexões diretas de uma barreira para os receptores que estão do lado oposto da via, não sendo protegidos pela barreira (Figura 17a). Na próxima situação refere-se às múltiplas reflexões entre barreiras paralelas, que alcançam os receptores mesmo sendo protegidos pela barreira, diminuindo assim a região de sombra, o que pode minimizar a eficiência do desempenho de atenuação (Figura 17b). A terceira situação exemplifica as múltiplas reflexões

do som entre a barreira e veículos altos como caminhões, ônibus e trens, ou ainda edificações localizadas à sua frente, sendo esta, de forma similar ao exemplo de barreiras paralelas, provocando a diminuição da região de sombra, bem como a eficiência da barreira (Figura 17c).

E, por fim, a quarta situação envolve reflexões entre as barreiras (Figura 17d), quando há edifícios localizados atrás das barreiras acústicas. Pois, múltiplas reflexões das ondas difratadas pelo topo da barreira entre as edificações próximas e a superfície interna da barreira podem também degradar a perda por inserção para receptores localizados em pavimentos inferiores da construção ou ao nível do solo.

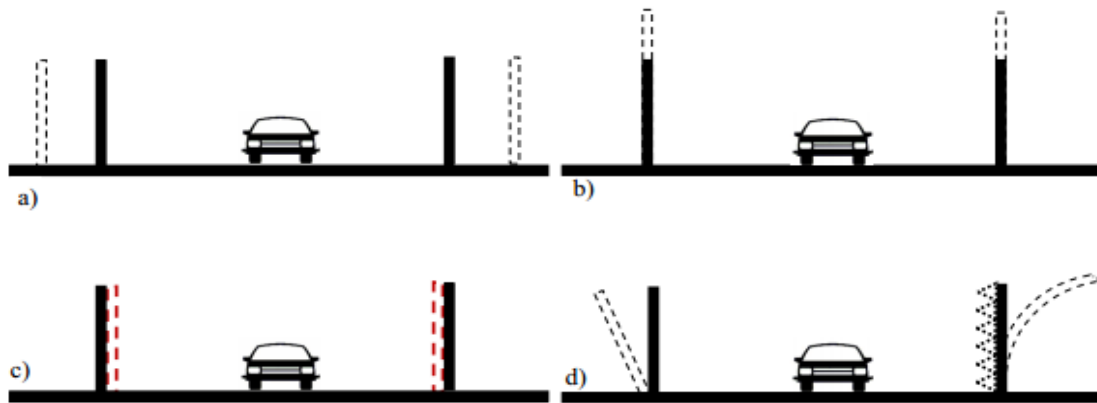
Figura 17 – Reflexão sonora em barreiras acústicas.



Fonte: Pazos (2015).

A elevação do nível sonoro relacionada às reflexões entre barreiras está diretamente ligada ao material, ao *design*, à altura, bem como à distância entre as barreiras paralelas ou às edificações próximas (PAZOS, 2015). Assim, com base em pesquisas realizadas por Pazos (2015), medidas simples para resolver ou minimizar o problema de reflexões sonoras a partir de barreiras acústicas, pode-se considerar o aumento da distância entre barreiras paralelas (Figura 18a), o aumento das alturas (Figura 18b); a aplicação de material absorvedor nas superfícies (Figura 18c), a construção de barreiras centrais absorvedoras entre barreiras paralelas; o uso de superfícies expostas ao ruído com geometrias especiais (Figura 18d), como inclinadas, curvadas ou corrugadas.

Figura 18 – Formas de minimizar os efeitos de reflexões sonoras em barreiras acústicas: (a) afastamento de barreiras paralelas, (b) aumento da altura de barreiras paralelas, (c) aplicação de material absorvedor nas superfícies e (d) barreiras com geometrias especiais (inclinadas, curvadas ou corrugadas).



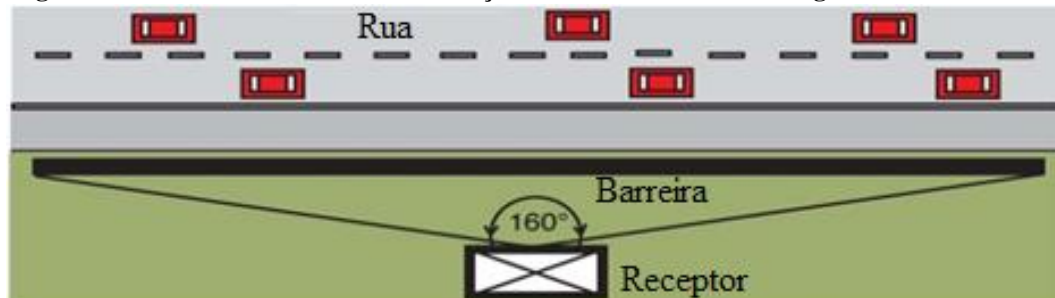
Fonte: Pazos (2015).

2.12 COMPRIMENTO DA BARREIRA ACÚSTICA

A difração de som gerada por uma barreira acústica ocorre não só na borda superior, mas também em torno das extremidades da barreira. Em vista disso, a redução de ruído global proporcionada por este aparato depende não só da sua altura e localização entre a fonte de ruído e o receptor, mas também do comprimento (KOTZEN; ENGLISH, 2009). O som difratado em torno das extremidades de uma barreira tenderá a ser menos significativo do que o som difratado na borda superior, uma vez que este caminho de transmissão contribui para absorção do som no solo, assim atenuado o raio direto (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Conforme Kotzen e English (2009), verifica-se que normalmente uma barreira que cobre um ângulo de 160° subtendido do receptor para a rodovia irá assegurar que os raios difratados pelas extremidades não são significativos (Figura 19).

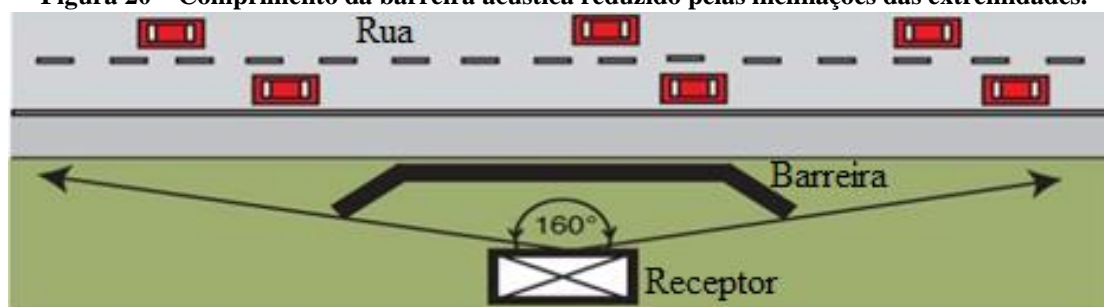
Figura 19 – Barreira acústica sem inclinação nas extremidades com ângulo de visão de 160° .



Fonte: Kotzen e English (2009).

Visto que, o comprimento da barreira acústica pode ser reduzido pela inclinação das extremidades, se houver espaço disponível, conforme a Figura 20.

Figura 20 – Comprimento da barreira acústica reduzido pelas inclinações das extremidades.



Fonte: Kotzen e English (2009).

Barreiras acústicas podem ter de 5 a 10 metros de altura e devem reduzir o ruído com relação aos níveis sonoros máximos permitidos por normas e legislações, e, ser aceita pelas autoridades de planejamento. Contudo, para ser verdadeiramente bem-sucedida, deve merecer a aprovação dos habitantes locais. Enfim, o projeto de uma barreira deve ser elaborado para se integrar bem em seu entorno (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

A concepção e o *design* de barreiras acústicas são um processo complicado. É presumível que os melhores resultados sejam atingidos por meios dos serviços coordenados por especialistas acústicos qualificados, engenheiros civis e estruturais e arquitetos paisagistas, aliados a outros conhecimentos de consultorias especialistas em meio ambiente e planejamento urbano (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Para os projetistas estão disponíveis diversos materiais para barreiras acústicas, todavia, deve-se levar em consideração algumas importantes orientações. Primeiramente, não devem construir barreiras porosas, ou seja, a passagem de ar através delas deve ser bloqueada. A segunda orientação, é em relação a massa, pois deve ser suficiente para que o ruído transmitido através da barreira seja significativamente menor do que o som difratado no topo ou ao redor da barreira. Essa consideração leva à exigência de que barreiras sejam construídas de um material com densidade de superfície total de pelo menos 20 kg/m^2 (LONG, 2006; BISTAFA, 2011). A terceira instrução, é que esses anteparos devem ser resistentes às intempéries e projetadas adequadamente para resistir ao vento e a outras cargas estruturais apropriadas para o local (LONG, 2006). De acordo com os autores Tennis et al. (2004) e El-Hassan et al. (2019), o concreto tem uma densidade típica entre 16 e 20 kg/m^2 .

Na prática qualquer espessura de concreto ou alvenaria de concreto que seja autossustentável pode atender à exigência de massa específica. Para barreira acústica, painéis de concreto pré-moldado, tratados para semelhares com madeira ou tijolo e suportados por colunas de viga, estão comercialmente disponíveis, e sendo amplamente utilizados próximos às rodovias e áreas urbanas (LONG, 2006).

Segundo os autores Wang et al., (2005), pode-se considerar que há quatro parâmetros primários que determinam a eficácia de uma barreira na redução do ruído, sendo (1) a distância entre a fonte e a barreira, (2) a distância entre barreira e receptor, (3) altura da barreira e (4) comprimento da barreira acústica.

Na literatura e em diversas pesquisas científicas, encontra-se para cálculos de atenuação sonora de barreiras acústicas a fórmula de Kurze e Anderson (1971), consagrada como sendo uma das mais representativas. A fórmula surgiu a partir da curva de Maekawa (1968), o qual utilizou o número de *Fresnel* (N), em seus experimentos e medições em situações reais. O número (N), é determinado pela diferença entre o caminho de propagação que atinge a borda da barreira e o caminho direto através da barreira, é um parâmetro adimensional, Equação 6:

$$N = \frac{2\delta}{\lambda} \quad (6)$$

onde:

δ = é a diferença (metros) dos trajetos por cima da barreira e através da barreira;

λ = é o comprimento de onda sonora, (metros); conforme destaca a Equação 7 e a geometria dada na Figura 21.

$$\delta = a + b - c \quad (7)$$

onde:

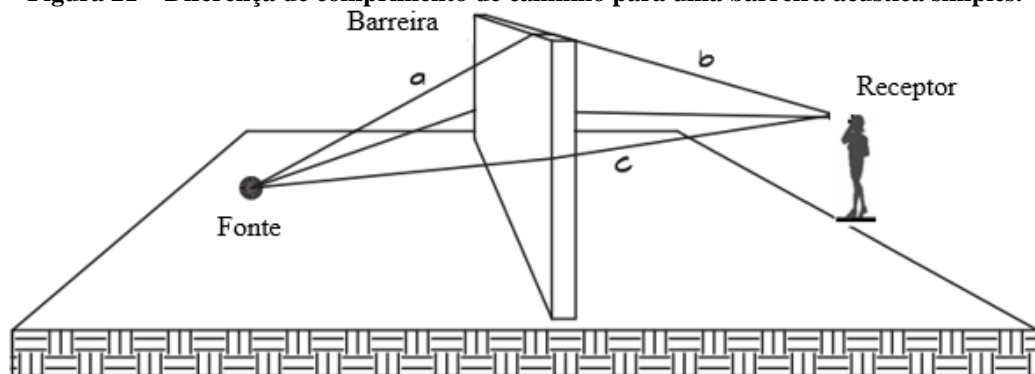
a = é a distância da fonte ao topo da barreira, (metros);

b = é a distância entre receptor e o topo da barreira, (metros);

c = é a distância entre fonte e o receptor, (metros).

A Figura 21 ilustra a diferença de comprimento de caminho para uma barreira simples.

Figura 21 – Diferença de comprimento de caminho para uma barreira acústica simples.



Fonte: Adaptado de Long (2006).

Os pesquisadores Kurze e Anderson, em 1971, apresentaram uma aproximação simples para a atenuação de ondas sonoras devido à difração de borda sobre uma barreira rígida. A pesquisa é derivada por uma revisão de vários resultados teóricos e experimentais. Desde então,

diversas pesquisas científicas aplicam ou referenciam o método de cálculo proposto por Kurze/Anderson e Maekawa (1968). A fórmula sugerida por Kurze e Anderson (1971) está expressa na Equação 8.

$$At = 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh(\sqrt{2\pi N})} + 5 \quad (8)$$

O valor 5 é uma constante que deve ser aplicada, especificamente, para barreira acústica em forma de parede, barreira simples, e, quando for uma berma, deve-se aplicar um valor constante igual a 8 (LONG, 2006).

2.13 MODELOS DE BARREIRAS ACÚSTICAS

A Dinamarca, no final da década de 1990, forneceu um bom exemplo de boas práticas de projeto de barreiras acústica, quando se verificou o crescimento do tráfego nas vias principais, o que resultou em ruído excessivo na área de Bispeengbuen em Copenhague. Alguns modelos construídos de barreiras foram apresentados, conforme ilustrados nas Figuras 22 a 25.

Figura 22 – Modelo de seções de barreira acústica em Copenhague, Dinamarca.



Fonte: Kotzen e English (2009).

Figura 23 – Modelo de barreira acústica em Copenhague, Dinamarca.



Fonte: Kotzen e English (2009).

Barreira acústica transparente simples, com estrutura de suporte de alumínio extrudado, construído em 1998 (Figura 24).

Figura 24 – Barreira acústica instalada em Copenhague, Dinamarca.



Fonte: Kotzen e English (2009).

Conforme mostra a Figura 25, situações como esta, a implementação de uma segunda barreira acústica, localizada entre as faixas de rodagem, pode ser de considerável vantagem,

uma vez que as duas barreiras são mantidas o mais próximo possível das duas fontes de ruído (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Figura 25 - Barreira central combinada com barreiras laterais em Hardinxveld, Holanda.



Fonte: Kotzen e English (2009).

Blocos de concreto (Figura 26), também têm sido usados para construir barreiras acústicas para atenuação de ruído de tráfego de veículos (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Figura 26 – Barreira de blocos de concreto, estilo vernacular do Oriente Médio.



Fonte: Kotzen e English (2009).

Painéis de concreto podem ser montados em tamanho e cores diferenciados (a cor pode ser incorporada nos painéis durante a fabricação por mistura de pigmentos) e, podem ser instalados entre suportes de aço. Dependentes de serem absorventes em um ou nos dois lados, os painéis possuem de 4 a 5 metros de comprimento e, geralmente, de 14 a 19 centímetros de espessura.

Painéis perfilados, conforme ilustra a Figura 27, tanto de forma horizontal ou vertical maximizam a atenuação do ruído. Tradicionalmente, as barreiras de concreto têm sido suportadas por colunas de aço ou em forma de “I”. Mais frequentemente, na prática as colunas em formas de “I” incorporam um flange inferior que é então aparafusada em uma pilha de aço ou uma base de concreto (KOTZEN; ENGLISH, 2009).

Figura 27 – Barreira de concreto. Perfis na horizontal (lado esquerdo) e vertical (lado direito).



Fonte: Kotzen e English (2009).

2.14 PREDIÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL: *SOFTWARE SOUNDPLAN*

O *software* comercial de modelagem e simulação acústica, *SoundPlan*, foi desenvolvido por uma empresa alemã *Braunstein + Berndt GmbH*, disponível no mercado desde 1986, sendo voltado para planejamento e gestão de ruído ambiental e industrial. O programa possibilita a elaboração de mapas acústicos urbano, de avaliações da propagação (curvas de ruído) e do impacto sonoro (cálculo dos níveis sonoros), além de comparações e projeções de cenários ambientais.

A seguir estão descritas, de forma sucinta, algumas informações do manual do *software*.

2.15 SIMULAÇÃO DE PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE

O programa de simulação, *SoundPlan*, possui um banco de dados com algoritmos que abordam as influências topográficas e atmosféricas, bem como, variáveis que caracterizam o fluxo de veículos automotores. Por exemplo, o *software* possibilita avaliar o nível de pressão sonora de uma via de trânsito a partir das características físicas, tais como: tipo de pavimento, volume de tráfego de veículos por categoria (leves e pesados), fluxo simples ou duplo, velocidade, dimensão da via, permite verificar a diferença de fluxo por horário e por trecho da via (SOUNDPLAN, 2018).

Para a simulação de tráfego rodoviário e atenuação de barreiras acústicas existem alguns modelos de cálculos implementados por diversos países:

1. Alemanha, *Richtlinien für Lärmschutz an Straßen* (RLS:1990), “para o ruído de tráfego, normalmente não precisa de um cálculo espectral, o programa usará um único valor”.
2. Grã Bretanha, *Calculation of Road Traffic Noise* (CRTN) 1988.
3. França, NMPB/XP S31-133, 1996/2001 (1/1 de oitava, 125-4000 Hz).
4. Áustria, RVS 3.02 *Lärmschutz* (RVS 3.02), 1997 (1/1 de oitava, 125-4000 Hz).
5. Países Nórdicos, *New Nordic Prediction Method* (Nord 2000), 2000 (1/3 de oitava).
6. Estados Unidos, *Traffic Noise Model* (TNM), 1998 (1/1 de oitava, 125-4000 Hz).
7. Estados-Membros da Europa, *CNOSSOS-EU*, 2014 (1/3 de oitava).

Os resultados detalhados por frequência (análise espectral) estão disponibilizados somente para as normas *Nord 2000* e *CNOSSOS*. Assim, faz-se necessário o conhecimento das normas para a aplicabilidade na simulação, pois como pode ser visto na entrada de dados da biblioteca do *SoundPlan* (*Library* -> *libraries* -> *Road Emission* -> *Nord 2000 Vehicles* ou *CNOSSOS Vehicles*) os conceitos e parâmetros são exigidos pelas normas (SOUNDPLAN, 2018).

2.16 PRINCÍPIOS DE CÁLCULO

O mapa acústico urbano é desenvolvido por uma série de cálculos de receptores de ponto único, em que a localização dos receptores é determinada por uma triangulação. A malha de triangulação é usada nos resultados gráficos para interpolar a localização das curvas de nível de ruído, as quais são representadas por escalas de cores. Todas as fontes são independentes e

podem ser calculadas separadamente. Os resultados de todas as contribuições das fontes podem ser adicionados ao nível resultante no receptor conforme a Equação 9:

$$L_{i,sum} = 10 \log \left[\sum_{i=1}^N 10^{(L_i/10)} \right] \quad (9)$$

onde:

$L_{i,sum}$ = é o nível sonoro total emitido.

A contribuição de fonte pontual pode ser descrita pela Equação 10:

$$L_i = L_w - C_1 - C_2 \dots C_n \quad (10)$$

onde:

L_i = nível de pressão medido no receptor;

L_w = nível de potência sonora (ou equivalente);

$C_1 \dots C_n$ = coeficientes que descrevem diferentes aspectos de propagação.

No que diz respeito às fontes lineares de rodovias e ferrovias são abstraídas para fontes pontuais e tratadas como fontes pontuais no cálculo de nível de pressão sonora (SOUNDPLAN, 2018). Em geral, mapeamento de ruído e avaliações são fundamentados no filtro dB, ponderado em “A”, no entanto, qualquer filtro pode ser definido de linear para B, C e D. Para a avaliação, tem-se a grandeza L_{eq} , que representa um nível médio de som durante um período de tempo definido.

O nível sonoro em um receptor é derivado da potência do som e da propagação, para tanto, os coeficientes de propagação são absorção do ar, efeito do solo, reflexão e barreiras.

2.16.1 Absorção do Ar

O ar, como qualquer outro meio, não permite que as ondas sonoras se propaguem sem perda. As perdas dependem da temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e frequência. O *software SoundPlan*, utiliza as recomendações da norma RLS:1990 e ISO 9613:1996, para cálculo ao ar livre.

2.16.2 Efeito do Solo

A onda sonora interage com a superfície do solo, podendo ser refletida e absorvida, e, interferências entre a onda direta e a onda refletida podem ocorrer, assim afetando diretamente na propagação do som da fonte ao receptor. A norma ISO 9613-2:1996, em seu método de geral

de cálculo, sobre o efeito do solo, leva em conta as propriedades acústicas de cada superfície aplicando um fator G . São apresentadas a seguir as três categorias de superfícies refletoras:

Solo duro: inclui pavimentação, água, gelo, concreto e todas as outras superfícies de solo com baixa porosidade. Para solo duro $G = 0$.

Solo poroso: o modelo considera o solo coberto por grama, árvores ou outras vegetações, e todas as outras superfícies terrestres adequadas para o crescimento da vegetação. Para solo poroso $G = 1$.

Terreno misto: quando a superfície consistir em solo duro e poroso, então G assume valores que variam de 0 a 1, sendo o valor a fração da região que é porosa.

2.16.3 Reflexão Sonora

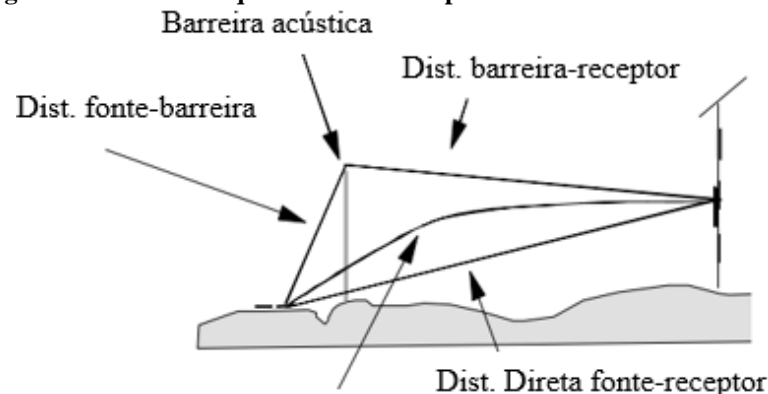
O principal princípio da reflexão é o Ângulo Incidente = Ângulo de Reflexão. Os ângulos incidente e reflexão devem ser observados tanto na planta quanto na terceira dimensão.

Se uma parede se qualifica para a reflexão há uma perda associada à reflexão, pois a parede está absorvendo parte da energia sonora. A absorção e a perda de reflexão são características do material, portanto, o usuário deve inseri-las no *software*. Neste caso, o programa *SoundPlan* requer a entrada das perdas de reflexão em dB e o coeficiente de absorção sonora de acordo com o tipo de material.

2.16.4 Barreiras: Princípios de Cálculo

A atenuação ocorre quando uma onda sonora é difratada em torno de uma borda, o que pode acontecer em torno de bordas horizontais e verticais. Desta forma, o princípio do comprimento do caminho adotado pelo *SoundPlan* é conforme ilustra a Figura 28.

Figura 28 – Caminho que a onda sonora percorre até a barreira acústica.



Fonte: Manual do *software SoundPlan* (2018).

O comprimento do caminho é a distância que o som tem que percorrer o obstáculo, considerando: (distância da fonte à barreira) + (distância do receptor à barreira) - (distância do receptor à fonte). No *software*, os efeitos de difração podem ser encontrados em barreiras acústicas, o manual do programa destaca que o efeito de atenuação em si é melhor descrito com a teoria do número de Fresnel (N), porém não são todas as normas que permitem a comparação direta com esta teoria.

Como as linhas de elevação (curvas de nível) são avaliadas para atenuação e efeito de solo, recomenda-se gerar o modelo do terreno com suas devidas altimetrias. Se pretende projetar e otimizar as barreiras acústicas, sempre é possível copiar as coordenadas do arquivo de linhas de elevação para o arquivo da barreira (SOUNDPLAN, 2018).

Em relação ao material da barreira, para o método de cálculo de atenuação, as propriedades acústicas (coeficiente de absorção, perda de reflexão em dB, e coeficiente de reflexão) são inseridas para o lado esquerdo e lado direito, direção de entrada de dados. Para o ruído de tráfego, normalmente não precisa de um cálculo espectral da reflexão, pode-se usar as seguintes configurações que o método alemão RLS:1990 define, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros de entrada definidos pelo método alemão RLS:1990 para simulação de barreira.

Tipo de parede	Perda de reflexão, em dB	Coefficiente de absorção (α)	Coefficiente de reflexão
<i>Reflexivo (concreto, vidro)</i>	1	0,206	0,794
<i>Barreira acústica absorvente</i>	4	0,602	0,398
<i>Barreira acústica altamente absorvente</i>	8 – 11	0,842 – 0,921	0,158 – 0,079

Fonte: Manual do *software SoundPlan* (2018).

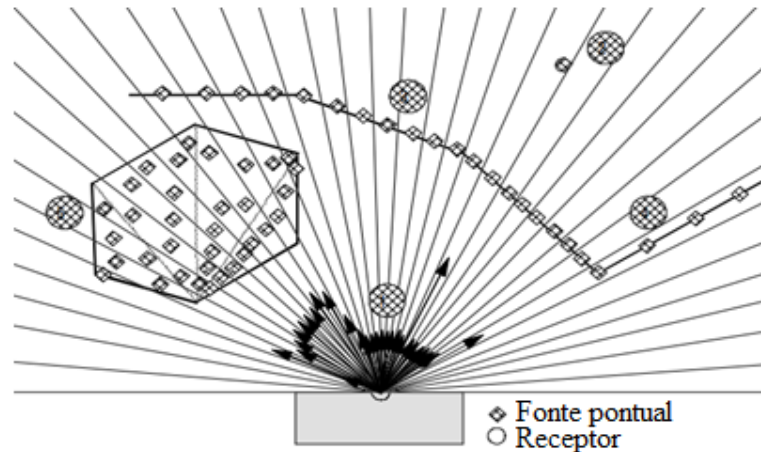
2.16.5 O método de Pesquisa por Ângulo

O *software SoundPlan* usa um método setorial, ou seja, a partir do receptor os “raios” buscam a geometria procurando por fontes, reflexões, barreiras e geometrias que interferem na atenuação do solo. Os raios de varredura usam um ângulo de incremento constante de 1 grau (configuração padrão), mas o usuário pode optar por qualquer incremento. Quanto menores forem os incrementos, mais precisos e lentos serão os cálculos. O usuário deve considerar o *trade-off* de velocidade *versus* precisão para o cálculo específico. Segundo o exposto no manual do *software*, para os cálculos efetuados “estritamente de acordo com o método RLS:1990”, o incremento angular é ajustado para 1° (um grau) e não está sujeito a modificação.

Estudar a definição, de modo mais aprofundado, mostra que um triângulo de busca é uma descrição mais precisa do que um raio de busca. Como um triângulo de busca se une a outro, cobrem todo o solo ao redor do receptor, enquanto um conjunto de raios perderia os

componentes entre os raios. Quando o *Software* encontra uma fonte na direção da pesquisa, ele calcula automaticamente a parte da fonte contida no triângulo de pesquisa. A Figura 29 mostra a representação do princípio do método de triângulo de busca.

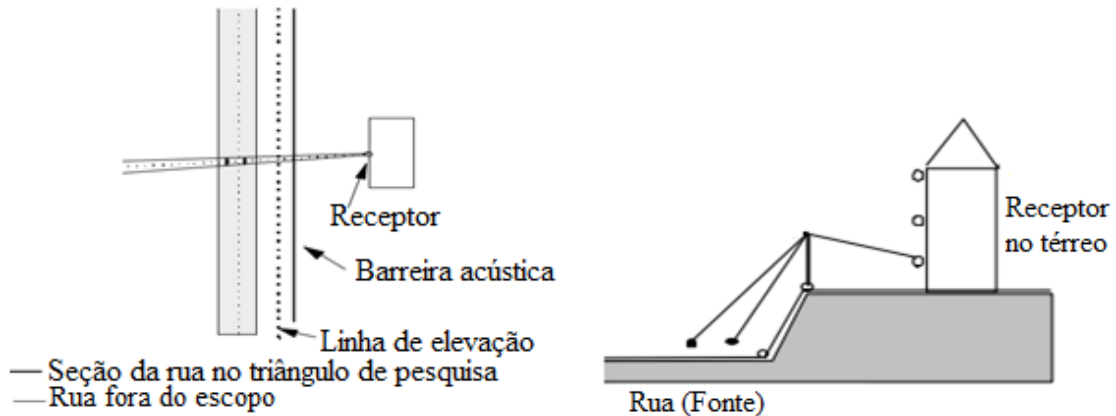
Figura 29 – Princípio do método triângulo de busca.



Fonte: Manual do software *SoundPlan* (2018).

A Figura 30 ilustra um outro exemplo, as fontes lineares são automaticamente divididas em segmentos que se encaixam nos triângulos de pesquisa, e o cálculo é realizado com a geometria exatamente entre a fonte e o receptor. O receptor está separado por uma barreira acústica, uma linha de elevação também faz parte do modelo.

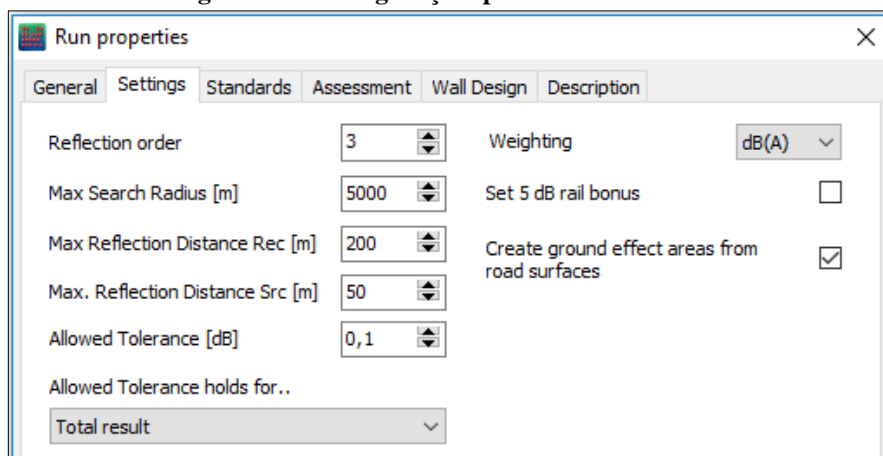
Figura 30 – Método de cálculo. A) Planta baixa do modelo. B) Modelo na vertical.



Fonte: Manual do software *SoundPlan* (2018).

Durante o cálculo, o *Software* pesquisa as fontes a uma distância pré-definida ao redor do receptor. O raio máximo de pesquisa (*maximal search radius*), cuja configuração padrão é de 5000 metros, estabelece a distância na qual uma fonte pode ser encontrada em relação ao receptor. Os demais parâmetros (ordem de reflexão, distância máxima e mínima de reflexão, tolerância e ponderação) também são pré-definidos pelo programa. Conforme apresenta a Figura 31, estes são valores recomendados, embora podem ser alterados à critério do usuário.

Figura 31 – Configurações para cálculo de ruído.



Fonte: Manual do software *SoundPlan* (2018).

2.17 EXPERIMENTO FATORIAL

O experimento fatorial pode ser visto como uma ferramenta do mundo científico e de engenharia para melhorar o processo de realização do produto. Em estudos experimentais uma abordagem científica deve ser empregada para que os dados apropriados sejam coletados e analisados por métodos estatísticos, resultando em conclusões objetivas e válidas (MONTGOMERY, 2013).

Experimentos fatoriais são experimentos que investigam os efeitos de dois ou mais fatores ou parâmetros de entrada na resposta de saída de um processo. O projeto de experimento fatorial, ou simplesmente planejamento fatorial, é um método sistemático para formular as etapas necessárias para implementar com sucesso uma análise fatorial. Estimar os efeitos de vários fatores na saída de um processo com um número mínimo de observações é crucial para poder otimizar a saída do processo (MONTGOMERY, 2013).

O projeto fatorial é amplamente utilizado em experimentos envolvendo vários fatores, onde é necessário estudar o efeito conjunto dos fatores em uma resposta. Cada ensaio completo ou replicação do experimento leva em conta todas as combinações possíveis dos diferentes níveis desses fatores. Por replicação, entende-se uma repetição independente de cada combinação de fatores (MONTGOMERY, 2013). Uma réplica completa requer 2^k observações, chamada de um planejamento fatorial 2^k .

Perecin e Cargnelutti Filho (2008) explicam que um experimento é intitulado fatorial quando cada tratamento combina simultaneamente níveis de dois ou mais fatores, ou seja, significa que há múltiplos fatores em estudo concomitantemente. Em geral, os experimentos fatoriais são mais eficientes para esse tipo de experimento. No entanto, não somente os valores

quantitativos, mas também os qualitativos que constitui cada fator são chamados de níveis do fator e as combinações entre os níveis formam os tratamentos do experimento fatorial (STORCK et al., 2006; PERECIN; CARGNELUTTI FILHO, 2008; MONTGOMERY, 2013).

O efeito de um fator é definido como a mudança na resposta produzida por uma mudança no nível do fator. Isso é frequentemente chamado de “efeito principal”, porque se refere aos principais fatores de interesse no experimento (MONTGOMERY, 2013).

A Tabela 5 mostra um exemplo de um experimento fatorial simples envolvendo dois fatores com dois níveis cada. Os dois níveis de cada fator podem ser arbitrariamente chamados de “nível baixo” e “nível alto”, que são geralmente simbolizados por (-) e (+) em experimentos fatoriais. O primeiro *design* da série 2^k está com apenas dois fatores, A e B, cada um executado em dois níveis. Este projeto é chamado de um projeto/planejamento fatorial 2^2 , sendo uma sequência de experimentos, levando em consideração todas as possíveis combinações dos fatores investigados.

Tabela 5 – Codificação para matriz de um planejamento fatorial.

Criar <i>Design</i> fatorial - Fatores		
A	B	Combinações de tratamento
-	-	<i>A baixo, B baixo</i>
+	-	<i>A alto, B baixo</i>
-	+	<i>A baixo, B alto</i>
+	+	<i>A alto, B alto</i>

Fonte: Montgomery (2013).

2.17.1 Cálculos dos Efeitos e da Interação entre os Fatores

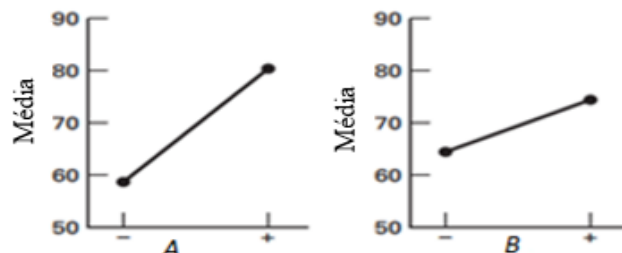
Para os autores Montgomery (2013) e Santos (2017), o efeito principal é calculado como a diferença entre a média das respostas no nível superior (+) e a média das respostas no nível inferior (-). Portanto, os dois efeitos principais de um experimento fatorial 2^2 , com n réplicas (tamanho da amostra), matematicamente podem ser derivados por meio das Equações 11 e 12:

$$A = \bar{y}_{A(+)} - \bar{y}_{A(-)} = \frac{ab + a}{2n} - \frac{b + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} + [ab + a - b - (1)] \quad (11)$$

$$B = \bar{y}_{B(+)} - \bar{y}_{B(-)} = \frac{ab + b}{2n} - \frac{a + (1)}{2n} = \frac{1}{2n} + [ab + b - a - (1)] \quad (12)$$

A leitura gráfica da resposta “efeito principal” está ilustrada na Figura 32.

Figura 32 – Efeito principal dos fatores A e B.



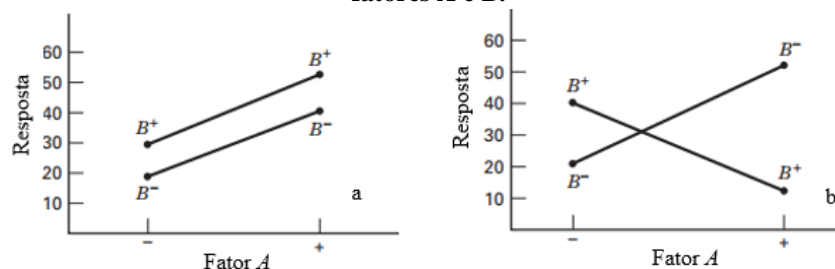
Fonte: Montgomery (2013).

Deve-se notar que, além do efeito principal, em alguns experimentos, pode-se descobrir que a diferença na resposta entre os níveis de um fator não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores. Quando isso ocorre, há uma interação entre os fatores (PERECIN; CARGNELUTTI FILHO, 2008; MONTGOMERY, 2013). O efeito de interação AB é a média das combinações de tratamento diagonal, direita-esquerda, menos a média das combinações de tratamento diagonal da esquerda para a direita ou por meio da Equação 13:

$$AB = \frac{ab + (1)}{2n} - \frac{a + b}{2n} = \frac{1}{2n} + [ab + (1) - a - b] \quad (13)$$

A Figura 33 apresenta um exemplo de quando há e não há interação entre os fatores “A e B”. A magnitude do efeito de interação é a diferença média nestes dois efeitos “A ou AB”. Note que as linhas B e B estão aproximadamente paralelas (Figura 33a), indicando uma falta de interação entre os fatores “A e B”. Similarmente, a Figura 33b mostra os dados de resposta, observa-se que as linhas B e B não são paralelas, isso indica uma interação entre os fatores “A e B”.

Figura 33 – Efeito de interação entre os fatores. a) Quando não há interação. b) Há interação entre os fatores A e B.



Fonte: Montgomery (2013).

Em experimento fatorial envolvendo projetos de 2^k , é sempre importante examinar a magnitude e a direção dos efeitos do fator para determinar quais variáveis provavelmente serão importantes. A análise de variância geralmente pode ser usada para confirmar essa interpretação, pois determina se a variabilidade das médias é estatisticamente significativa no estudo de experimento fatorial (MONTGOMERY, 2013; SANTOS, 2017). No entanto, testes estatísticos podem ser usados, como o testes-t, valo-F e valor-P. Existem vários pacotes de *software* de estatísticas excelentes que são úteis para configurar e analisar projetos 2^k , por

exemplo, o software *Minitab* (MONTGOMERY, 2013). Em um experimento fatorial 2^k , é fácil expressar os resultados em termos de um modelo de regressão linear simples e análise de variância.

2.18 ESTUDOS RELACIONADOS AO TEMA DA PESQUISA

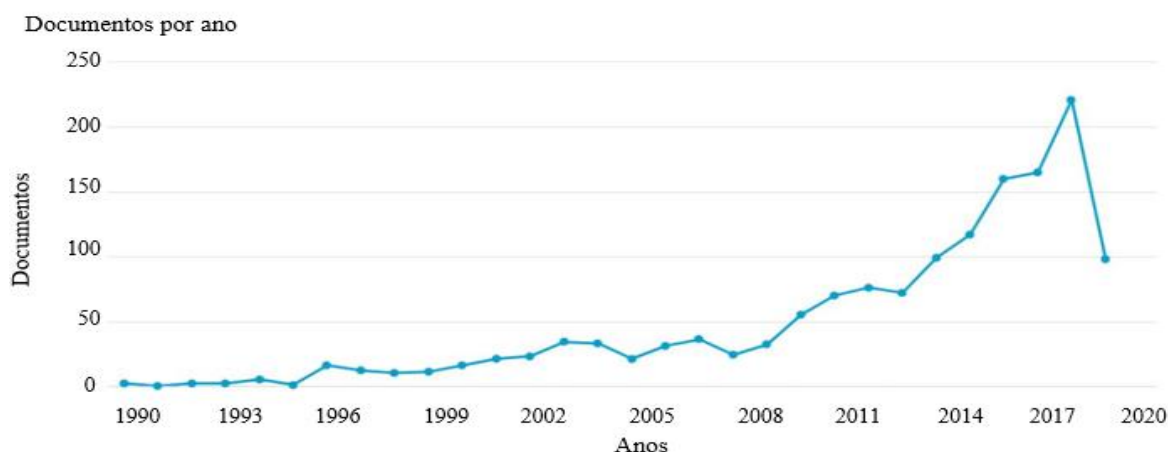
A presente seção apresenta a revisão bibliográfica, permitindo posicionar esta pesquisa diante do exposto aos outros estudos realizados, que estão relacionados ao assunto desta tese. Primeiramente, apresenta-se temas sobre mapeamento de ruído ambiental, e, na sequência são estudos sobre barreiras acústicas. Assim, como o objetivo é de encontrar diversas pesquisas científicas sobre os principais temas que estão abordados nesta tese, realizou-se uma busca na base de dados do *Scopus Search* e *Science Direct*.

Para tanto, com base em palavras-chave, elaborou-se uma *string* de busca, a saber: ((“*Noise Barrier*” OR “*Noise Mapping*” OR “*Noise*” OR “*Acoustics*”) AND (“*Acoustic Noise*” OR “*Traffic Noise*” OR “*Environmental Acoustics*”) AND (*Noise Control* OR *Noise Sources* OR “*Noise Assessment*” OR “*City Sound Monitoring*” OR “*Vehicle Acoustics*” OR “*Sound Absorption*”) AND (*Noise Assessment and Control* OR “*Road Traffic Noise Modeling*” OR “*Materials for Noise Control*” OR “*acoustic variables Control*”). A última busca realizada, na plataforma *Scopus*, foi em maio de 2019.

Por meio de *string* de busca, do decorrer dos anos entre 1990 e 2019, os artigos científicos representam 86,3% em relação a outro tipo de documento, por exemplo, documentos de conferência 7,6%, artigos de revisão 6,1%, e cartas 0,1%. Todos os estudos estão relacionados com a área de pesquisa sobre poluição sonora ambiental.

A Figura 34, apresenta de forma gráfica a produção científica publicada na plataforma do *Scopus Search*, entre 1990 e maio de 2019.

Figura 34 – Produção científica disponibilizada pela plataforma *Scopus Search* de 1990 a 2019.



Fonte: Scopus (2019).

2.18.1 Mapas de Ruído Ambiental

A pesquisa de Lee et al. (2008), denominada “*Utilizing noise mapping for environmental impact assessment in a downtown redevelopment area of Seoul, Korea*”, aponta que para realizar a avaliação de impacto ambiental sonoro proveniente de construção civil é necessário considerar três principais etapas: (I) levantamento quantitativo do ruído externo, (II) previsão dos níveis sonoros induzidos por obras futuras, e (III) predição do ruído após o término de um projeto. Os autores relatam que na prática, em campo, ocorre uma forma simples de avaliar o ruído, notando-se apenas que a atenuação ocorre devido à distância entre a fonte sonora e o receptor, não considerando os fenômenos acústicos complexos como difração, absorção e reflexão que acontece devido às configurações topográficas na região em avaliação do sonora.

Os pesquisadores enfatizam que, para considerar as complexidades físicas e acústicas é preciso fazer uso de ferramenta específica para mapeamento de ruído, só assim, pode-se produzir uma série de mapas de ruído para estudar o ambiente atual e prever impactos sonoros no futuro, os autores fizeram uso do programa *SoundPlan* para gerar mapas e simulações futuras. Quanto aos modelos de cálculo do ruído proveniente da construção civil e do tráfego rodoviário aplicaram a ISO 9613-2:1996 e a norma RLS:1990, respectivamente. A pesquisa ressalta que a diferença entre o nível sonoro medido e o simulado deveria ser menor de 3 dB, para prosseguirem ao próximo passo.

No entanto, para obter um mapa acústico significativo, tanto a informação acusticamente *in loco*, quanto a atual topografia da área em análise (curvas de nível) são essenciais em um projeto acústico ambiental. Na Coreia, os modelos internacionais de previsão sonora, bem como as boas práticas para modelagem são adotados para avaliação de ruído ambiental por meio de modelo computacional. Contudo, os níveis sonoros existentes são medidos *in loco* de acordo a norma da Coreia (*Korean Standard Test Method of Noise and Vibration*) e avaliados conforme sua regulamentação (*Korean Standard or Regulation for Noise*).

Os autores sublinham que um mapa acústico é muito mais do que simplesmente uma representação gráfica dos níveis sonoros, é uma ferramenta científica e eficiente para avaliar os fenômenos acústicos complexos, podendo visualizar de forma qualitativa e quantitativa o impacto do ruído urbano. Assim, permite que autoridades municipais possam tomar decisões relativas ao monitoramento e controle da poluição sonora, haja vista que, o mapa possibilita a simulação de ruído para um ambiente futuro.

Manvell e Banda (2011), publicaram um estudo intitulado “*Good practice in the use of noise mapping software*”, os autores tiveram como objetivo descrever os principais fatores que influenciam na produção de mapas de ruído, assim como, os métodos para garantir as boas práticas para se obter qualidade dos resultados de um mapeamento sonoro. Após duas décadas de desenvolvimento, os *softwares* para elaborar mapas de ruído ambiental tornaram-se uma ferramenta profissional adotada em diversos países e por usuários com diferentes experiências em aplicações nos *softwares* utilizados. Entretanto, profissionais têm a probabilidade de intervir na qualidade do método de mapeamento de ruído, sendo os principais motivos que afetam a boa prática:

- O conhecimento do usuário sobre o *software*;
- O conhecimento do usuário sobre a norma;
- A implementação de norma;
- A garantia de qualidade da implementação de *software*;
- Na análise do usuário da qualidade e impacto dos parâmetros de entrada;
- A configurações do *software* para os resultados dos cálculos.

Em 2006, o Grupo de Trabalho da Comissão Europeia para Avaliação da Exposição ao Ruído elaborou o “Guia de Boas Práticas para o Mapeamento Estratégico de Ruídos e a Produção de Dados Associados na Exposição ao Ruído”, versão 2. Observa-se que os desenvolvedores de normas, de *softwares* e os usuários estão compartilhando a responsabilidade pela qualidade dos resultados dos mapas de ruído (MANVELL; BANDA, 2011).

No Brasil, os autores Zannin e Sant’Ana (2011), desenvolveram uma pesquisa intitulada “*Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project – A case study in Brazil*”, os pesquisadores tiveram a preocupação de apresentar que em Curitiba, cidade da região sul do Brasil, o ruído proveniente de poluição sonora está diretamente ligado ao aumento de circulação de veículos automotores. No entanto, tiveram como objetivo principal realizar uma avaliação acústica as margens da rodovia federal BR-116, a qual, encontra-se dentro dos limites urbanos com alta densidade populacional em seu entorno, e, também, é um corredor de transporte público.

Para tanto, realizaram medições dos níveis sonoros em campo, de segunda-feira a sexta-feira durante o dia, evitando horário de pico, fins de semana e feriados. Utilizaram a grandeza L_{Aeq} (nível sonoro contínuo equivalente) para avaliar 28 pontos localizados no intervalo de 500 metros, cobrindo um trecho de 14 quilômetros, cada ponto de medição foi avaliado por 3

minutos, que segundo os pesquisadores, esse tempo de medição empregado mostrou-se suficiente para avaliar o ruído proveniente pelo tráfego de veículos.

Posteriormente a modelagem e validação do mapa acústico, os pesquisadores desenvolveram um modelo computacional para avaliação de um cenário futuro, previsão para os próximos 20 anos. No decorrer da pesquisa, os resultados obtidos por meio do mapeamento de ruído foram avaliados com os valores limites propostos pela legislação de Curitiba, Lei Ordinária Municipal nº. 10625:2002, a qual estabelece valores máximo de nível sonoro de acordo com cada período do dia e conforme a área de zoneamento. Zannin e Sant’Ana (2011), utilizaram o *software Predictor BK 7810*, versão 6.0, para elaborar os mapas de ruído, e, o modelo de cálculo para a predição, optaram pela norma internacional ISO 9613-2:1996. Uma referência que os autores tiveram como suporte foi o documento do Grupo de Trabalho da Comissão Europeia – Avaliação da Exposição ao Ruído (WG-AEN), que contém informações relevantes para validação do mapa de ruído (modelo computacional).

Em 2014, os autores Garg e Maji, publicaram uma importante pesquisa denominada “*A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications*”. O estudo apresenta uma comparação relevante dos principais modelos para predição de ruído ambiental nos países desenvolvidos, tais modelos vêm sendo adotados, pois tornaram-se ferramentas vitais para os planejadores urbanos, a fim de reduzir e monitorar o ruído ambiental. Os autores enfatizam que esse método de gestão para o controle de nível sonoro ganhou impulso especial a partir da Diretiva Europeia 2002/49/CE, sobre a poluição sonora ambiental.

Garg e Maji (2014), salientam que métodos numéricos avançados para a propagação sonora têm reduzido significativamente a incerteza nas predições de ruído ambiental, embora a abordagem é bastante complexa e necessita de habilidades especializadas em modelos matemáticos para predição, que na maioria são complicados para os planejadores urbanos e arquitetos paisagistas. De forma crítica, os autores tiveram a preocupação de expor os aspectos peculiares aos modelos matemáticos desenvolvidos e adotados por alguns países nos últimos anos. No documento encontra-se os seguintes modelos: norma alemã RLS:1990, *CoRTN* do Reino Unido, *FHWA* dos EUA, *Son Road* da Suíça, *ASJ RTN 2008* do Japão, *NMPB-Routes-2008* da França, *Harmonoise of Europe e Nord 2000* dos países da Escandinávia. Para esta tese, a evidência foi dada a norma alemã, RLS:1990.

Modelo RLS:1990 (*Richtlinien für den Lärmschutz an Straben*) é um modelo oficial alemão que calcula o nível de emissão de ruído L_{mE} a uma distância de 25 metros do centro de uma faixa de rodagem. O parâmetro $L_{m,E}$ é calculado em função da quantidade de veículos por hora, bem como da categoria de veículos (leves e pesados), pesados acima de 2,8 toneladas,

velocidade média da via de 100 km/h, superfície plana e com declive inferior a 5%. Por meio da Equação 14, expressa analiticamente, estima-se os valores de níveis sonoros equivalentes. As informações e Equações a seguir podem ser encontradas na norma alemã *Richtlinien für den Lärmschutz an Straben*, 1990.

$$L_{m,E} = 37,3 + 10 \log[Q \cdot (1 + 0,082p)] \quad (14)$$

onde:

L_m = é o nível sonoro ponderado em A;

Q = é o fluxo de tráfego de veículos por hora;

p = é a porcentagem de veículos pesados.

O algoritmo da norma alemã estima os diversos desvios das condições idealizadas para prever o nível sonoro gerado pelo ruído de tráfego urbano. O nível médio de L_{Am} em dB é calculado conforme a Equação 15.

$$L_m = L_{m,E} + D_{s\perp} + D_{BM} + D_B \quad (15)$$

onde:

$L_{Am,E}$ = é o nível equivalente médio de emissão, em dB;

$D_{s\perp}$ = é a atenuação devido à distância e a absorção do ar;

D_{BM} = é a atenuação devido aos efeitos atmosféricos e do solo;

D_B = é a atenuação devido à topografia e às dimensões dos edifícios.

O nível equivalente médio de emissão é calculado por meio da Equação 16:

$$L_{m,E} = L_{m(25)} + D_v + D_{StrO} + D_{Stg} + D_E \quad (16)$$

onde:

$L_{Am(25)}$ = é o nível equivalente a 25 metros do centro da pista, em dB;

D_v = é a correção devido à velocidade;

D_{StrO} = é a correção devido à superfície da rodovia;

D_{Stg} = é a correção devido ao gradiente, aclive ou declive;

D_E = é a correção devido à absorção das superfícies dos edifícios.

A correção devido à velocidade D_v é calculada pela Equação 17:

$$D_v = L_{Pkw} - 37,3 + 10 \log \left[\frac{100 + (10^{0,1D} - 1)}{100 + 8,23p} \right] \quad (17)$$

onde:

$L_{Pkw} = 27,7 + 10 \log[1 + (0,02 \cdot v_{Pkw})^3]$;

$L_{Lkw} = 23,1 + 12,5 \log(v_{Lkw})$;

v_{Pkw} = é a velocidade dos veículos leves, entre 30 e 130 km/h;

v_{Lkw} = é a velocidade dos veículos pesados, entre 30 e 80 km/h.

A norma também expõe uma tabela com valores entre 0 a 6 dB, referentes à correção devido aos diferentes tipos de pavimentação que são construídas as rodovias, assim como a velocidade, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Correção para diferentes tipos de pavimentação das rodovias.

Tipo da superfície da rodovia		Correção D_{Stro}		
		30 Km/h	40 Km/h	50 Km/h
1	Asfalto liso	0,0	0,0	0,0
2	Concreto, Asfalto rugoso	1,0	1,5	2,0
3	Calçamento regular	2,0	2,5	3,0
4	Calçamento irregular	3,0	4,5	6,0

Fonte: Norma alemã RLS:1990.

A correção devido ao gradiente longitudinal D_{Stg} , aclive ou declive, é dada por meio da expressão a seguir:

$D_{Stg} = 0,6 \cdot |g| - 3$, para $|g| > 5\%$; $D_{Stg} = 0$, para $|g| \leq 5\%$, onde g é a inclinação percentual longitudinal da rodovia.

Os autores Vogiatzis e Remy (2014), em sua pesquisa intitulada “*From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe*”, destacaram que no âmbito da Diretiva Europeia 2002/49/CE, as cidades de Volos e Larissa, na Grécia, em 2012, terminaram os seus mapas estratégicos de ruído, bem como os planos de ação que são relevantes e que definem os principais métodos para reduzir a exposição da população ao ruído, a fim de preservar a qualidade ambiental sonora.

A pesquisa, tratando-se de plano estratégico, expõe recomendações valiosas para preservar a qualidade ambiental sonora em áreas urbanas, principalmente, orientações aos tomadores de decisão (órgãos públicos, arquitetos, urbanistas) a evoluírem positivamente ao longo do tempo, a respeito de medição e modelagem dos níveis de ruído ambiental. Pois, este documento explica em detalhes a razão física para a existência de ter uma gestão voltada à qualidade sonora.

Monarca et al. (2016), desenvolveram uma pesquisa com o título “*Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile*”, cujo o principal objetivo da pesquisa foi apresentar uma avaliação e aplicação de métodos simplificados para gerar mapa de ruído ambiental. Os autores comentam que não há informações oficiais suficientes para auxiliar o desenvolvimento de mapas de ruído. Destacam

que métodos específicos e simples para a gestão de ruído ambiental estão tornando-se uma real necessidade para a comunidade acústica, principalmente em países em desenvolvimento.

Os autores realizaram a comparação de vários modelos de ruído de tráfego com as medições em campo e, conseqüentemente, o modelo de tráfego rodoviário RLS:1990 (*Richtlinien für den Lärmschutz an Straben*), foi o escolhido para produzir o mapa de ruído ambiental, usando o *software Computer Aided Noise Abatement (CadnaA)*. Para fazer a comparação do L_{Aeq} (nível de pressão sonora contínuo equivalente ponderada em A) medido *versus* modelado, realizaram as medições de ruído durante 10 minutos em cada ponto, um total de 80 pontos medidos. Concluíram que a metodologia desenvolvida auxilia, particularmente, nos países em desenvolvimento, para que possam obter aproximações precisas na produção de mapas de ruído de baixo custo.

Os autores Prezelj e Murovec (2017), em sua pesquisa denominada “*Traffic noise modelling and measurement: Inter-laboratory comparison*”, expõem a experiência sobre medição e modelagem de ruído de tráfego, afirmando que, a emissão de ruído e a propagação sonora podem ser efetivamente medidas e modeladas. Mostram que, os resultados das medições comparados aos calculados por modelagem estão próximos, tipicamente dentro da faixa de ± 3 dB, embora, em ambientes complexos o desvio dos resultados pode ser maior.

Os mesmos autores salientam que, a medição de ruído de tráfego e a modelagem são tarefas complexas, pois, uma variedade de níveis sonoros independentes provenientes de diversas fontes, como veículos leves e pesados, veículos lentos e velozes, bem como o ruído gerado por pessoas, animais, máquinas, indústrias, etc é sobreposto ao ruído de veículos que está sendo analisado. Prezelj e Murovec (2017), relatam que o método de coleta de dados sobre as características do tráfego e dos objetos que estão inseridos no caminho de propagação sonora é essencial para a modelagem de ruído. Os autores participaram de algumas modelagens e medições em ambientes distintos, e a comparação apresentada das modelagens e das medições de ruído de tráfego é particularmente confiável.

Khan et al. (2018), apresentaram um estudo designado “*Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques*”. Os autores tiveram alguns objetivos relevantes, dos quais contribuem para o desenvolvimento de outras pesquisas relacionadas ao tema. Este estudo tem a preocupação de resumir as práticas atuais de modelagens, destacando o potencial dos *softwares* de simulação/predição, e as técnicas de avaliação de exposição ao ruído ambiental.

Os pesquisadores realizaram uma busca bibliográfica sistemática para identificar estudos importantes relacionados à modelagem da poluição sonora. Os artigos científicos por

eles analisados foram publicados entre janeiro de 1999 e maio de 2017, disponibilizados nas plataformas *PubMed* e *Science Direct*. Devido à grande quantidade de trabalhos disponíveis nas bases de dados, adotaram uma metodologia de busca específica, a qual serviu de experiência a ser adotada por esta tese. Os autores elaboraram uma *string* de busca (conjunto de palavras-chave) para aprimorar o critério de pesquisa, como por exemplo, “tráfego rodoviário”, “poluição sonora”, “ruído ambiental”, “modelagem acústica”, “exposição ao ruído” e “avaliação” etc. Tiveram inicialmente 858 artigos científicos e, manualmente, reduziram para 57 artigos potencialmente relevantes.

Observou-se um ponto importante na pesquisa de Khan et al. (2018). Os autores relatam sobre alguns *softwares* para simulação de ruído, como o *SoundPlan* (*SoundPlan GmbH*), o *CadnaA* (*DataKustik GmbH*) e o *TRANEX*, e, destacaram que o pesquisador Hadzi-Nikolova et al. (2012) indicou o *SoundPlan* como o principal *software* de previsão de ruído ambiental. Da mesma forma os autores Bodin et al. (2016) e Sørensen et al. (2012, 2013, 2014, 2015) usaram o *SoundPlan* para avaliar os efeitos da exposição ao ruído do tráfego. Este programa é um pacote comercial que oferece módulos de simulação de alto nível para cálculos de poluição sonora. Diversos métodos europeus de modelagem acústica são implementados no programa, incluindo, por exemplo, o modelo alemão RLS:1990, o francês NMPB2008, métodos nórdicos: RTN 96 e Nord2000 Road.

Os autores ainda destacam a pesquisa dos estudiosos Chung et al. (2008) e Karantonis et al. (2010), que realizaram uma comparação do *SoundPlan* com o *CadnaA*, em termos de previsões de tráfego de vias arteriais. Após a pesquisa, ambos os pesquisadores relataram que o programa *SoundPlan* é tão preciso e eficaz quanto o programa *CadnaA* (KHAN et al., 2018).

2.18.2 Barreiras Acústicas

Em 1965, o pesquisador Maekawa apresentou sua tese sob o título “*Noise Reduction by Screens*” nas conferências especializadas do 5º Congresso de Acústica, em Liege. O artigo produzido a partir da tese de Maekawa, encontra-se publicado na revista *Applied Acoustics*, e até o momento foi referenciado em 608 trabalhos científicos relacionados à atenuação de barreiras acústicas. A pesquisa aborda dados experimentais sobre a difração sonora em barreiras semi-infinitas, implementadas em campo ao ar livre, de forma sucinta o autor também descreve sobre a aplicação do cálculo de reflexão especular. O estudo apresenta um método para calcular o efeito de atenuação, com o auxílio de um único gráfico e sem o uso de modelo computacional.

Em seu estudo experimental, o autor mediu os níveis de pressão sonora em vários pontos na zona de sombra, utilizando uma ampla gama de frequências para uma variedade de geometrias, para tanto, foi preciso aplicar o número de *Fresnel* (N). A variável (N) foi abordada na revisão de literatura desta tese. Segundo o autor, o número de *Fresnel* (N), é o método mais simples e confiável, de muitos, para calcular a difração de som com a melhor aproximação (MAEKAWA, 1968).

A partir do experimento de Maekawa, os autores Kurze e Anderson (1971), elaboraram uma outra fórmula para cálculo de atenuação sonora de barreiras acústicas longas, seguindo o mesmo princípio, apresentaram uma aproximação simples para a atenuação de ondas sonoras devido à difração de borda sobre uma barreira rígida. Assim, tanto o método de Maekawa quanto o método de Kurze e Anderson (1971), podem ser encontrados em diversas pesquisas e literaturas, como por exemplo (KURZE; ANDERSON, 1971; FUJIWAR et al., 1977; PARZYCH, 2004; WANG et al., 2005; LONG, 2006; MORAIS, 2008; BIES; HANSEN, 2009; KOTZEN; ENGLISH, 2009; KIM, 2010; WANG et al., 2018; AMARILLA et al., 2018).

Maekawa (1968), menciona que quando a distância entre a fonte sonora e o receptor é extensa, da ordem de 100 metros ou mais, deve-se considerar maior atenuação devido aos gradientes de temperatura e vento, assim como às condições atmosférica e efeito de absorção sonora no solo, entre outros mecanismos.

Os pesquisadores Joynt e Kang (2010), em um estudo sobre “*The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers*”, buscaram a resposta para três questões relacionadas à barreira acústica. (I) Os preconceitos sobre os materiais que constituem barreiras acústicas afetam o modo como as pessoas percebem que a barreira funcionará atenuando o ruído ambiental. (II) A preferência estética influencia a percepção de como uma barreira irá se comportar? (III) As barreiras, que são consideradas mais esteticamente agradáveis, têm maior probabilidade de serem percebidas como melhores atenuadores de ruído?

Por meio de um ambiente de realidade virtual os autores revelaram que preferências visuais por barreiras acústicas, teve-se uma correlação inversa entre a estética e a percepção de como uma barreira de controle de ruído funcionaria. Em diversas pesquisas científicas, os vários fatores visuais que afetam as percepções de áudio, foram analisados em estudos anteriores. Nesse estudo de Joynt e Kang (2010), utilizaram cinco tipos de barreiras acústicas incluindo concreto, madeira, metal, acrílico transparente e uma tela vegetativa. No entanto, como resultado obtiveram a transparente e a com vegetação julgadas mais esteticamente agradáveis, porém foram julgadas como as menos eficazes na atenuação do ruído.

Hong e Jeon (2014), também revelaram que as preferências visuais por barreiras acústicas foram inversamente correlacionadas com a percepção de atenuação de ruído. Na pesquisa intitulada “*The effects of audio – visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance*”, os autores tiveram como objetivo investigar as percepções inter sensoriais do desempenho de barreira acústica em termos de redução de ruído combinadas com impressões visuais de cinco diferentes tipos de barreiras: alumínio, madeira, acrílico translúcido, concreto e barreiras com vegetação.

Em particular, barreiras de concreto com plantas trepadeira foram percebidas como mais atraentes e melhoraram o desempenho de atenuação de ruído previsto, bem como a qualidade ambiental geral. As abordagens aplicadas pelos autores Hong e Jeon (2014), podem oferecer uma melhor compreensão sobre as percepções acústicas e visuais de materiais de barreiras, assim auxilia em soluções e estratégias ideais para o projeto de barreira de controle ruído ambiental.

A pesquisa intitulada “*In situ measurement of the acoustic performance of a full scale tramway low height noise barrier prototype*”, desenvolvida por Jolibois et al. (2015), descreve que em áreas urbanas a questão da exposição ao ruído ambiental é particularmente relevante, ao passo que mais da metade da população mundial é urbana, e estão expostas ao níveis sonoros elevados provenientes do transporte terrestre. Os autores salientam que a questão do ruído deve ser abordado não só no interior das edificações, mas também nas áreas exteriores, uma vez que, segundo a Organização Mundial de Saúde alerta que 20% da população europeia está exposta a níveis de ruído acima de 65 dB no período diurno, enquanto o nível máximo recomendado por lei, em ambientes externos durante o dia é de 55 dB.

As pesquisas científicas de diversas áreas e países deixaram bem documentado que a exposição prolongada ao ruído pode causar efeitos negativos à saúde, o que inclui aos danos de habilidades cognitivas, redução da qualidade do sono, irritação, e, conseqüentemente uma diminuição do desempenho (JOLIBOIS et al., 2015). Assim, uma possibilidade de controlar o ruído em áreas urbanas é a implementação de barreiras acústicas. É notório, que esse tipo de anteparo recebeu atenção significativa nas últimas décadas.

Os pesquisadores frisam um ponto fundamental, que diferentes projetos têm sido propostos para situações urbanas, incluindo a barreira acústica clássica tipo parede (HOROSHENKOV et al., 1999; THORSSON, 2000), barreiras complexas (BAULAC, 2006), barreiras de cristal sônicas feitas de cilindros paralelos (KOUSSA, 2012) e barreiras de gabiões (KOUSSA et al. 2013).

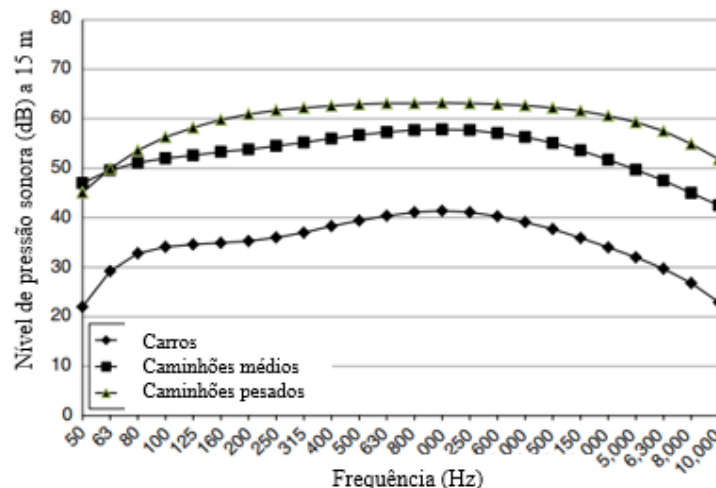
Em 2014, na universidade de Coimbra, o pesquisador Gonçalves realizou uma exaustiva pesquisa sobre “Atenuação sonora de barreiras acústicas”. Dentre os fatores que interferem a atenuação, o autor destaca que para o bom desempenho acústico a altura de uma barreira é essencial. No entanto, a altura é influenciada por diversos aspectos referentes à estética, ao custo, à topografia do terreno, aos requisitos necessários à construção das fundações. Quanto ao impacto visual pode ser atenuado por meio de estratégias como a decoração das barreiras ou a variação das suas alturas ao longo de todo o comprimento.

Gonçalves (2014) informa que se pode obter de forma fácil atenuações sonoras de 10 dB com a implementação de barreiras simples. E, para atingir reduções de 15 dB é preciso projetar estruturas mais complexas, tendo em consideração alturas elevadas e se preocupar em termos de detalhes de construção referente à transmissão do som através da barreira. De forma global, observou-se que há barreiras predominantemente com alturas médias de 2 a 6 metros, com eficiência numa perda por inserção entre 5 e 12 dB.

Em relação à frequência, é mencionado por Hendriks et al. (2013) e Gonçalves 2014, que uma onda sonora com uma frequência de 16 Hz e um comprimento de onda de cerca 21 metros tende a ultrapassar obstáculos até 5 metros de altura, aproximadamente. Assim como também é reportado que a tendência de aumento do ruído de tráfego ruído está na faixa de 250 Hz a 2000 Hz, constituindo uma vantagem, pois permite que as barreiras acústicas possam ser moderadamente baixas.

O autor Cowan (2006) mostra por meio da Figura 35, a tendência do aumento dos níveis de ruído do tráfego com o aumento da velocidade, são formas espectrais típicas para veículos leves (com dois eixos e quatro rodas), médios (com dois eixos e seis rodas) e pesados (com mais de dois eixos).

Figura 35 – Espectros de ruído de tráfego rodoviário típicos a velocidades de 80 km/hora.



Fonte: Cowan (2006).

Entretanto, o estudo de Jolibois et al. (2015), realizado na cidade de Saint-Martind'Hères, França, teve como objetivo montar um protótipo de barreira acústica, de baixa altura, em um ambiente real para avaliar o desempenho quanto a atenuação sonora. O teste em escala real foi realizado próximo a uma linha de bonde elétrico onde caracterizaram a perda de inserção, ou seja, a diferença de nível em um determinado ponto receptor com e sem a barreira acústica.

O protótipo da barreira acústica projetada em forma de L invertida, com comprimento total de pouco mais de 22 metros, de madeira prensada e fibra de vidro. A barreira cobre no máximo a metade do comprimento do bonde, que tem 43 metros de comprimento, ver o exemplo do protótipo a partir da Figura 36.

Figura 36 – Bonde próximo ao protótipo da barreira acústica.



Fonte: Jolibois et al. (2015).

O descritor nível equivalente de pressão sonora ponderada em “A” (L_{Aeq}) foi escolhido para quantificar o nível sonoro durante a passagem do bonde. Duas alturas de receptor foram consideradas, uma que corresponde a uma pessoa em pé, cerca de 1,5 metro, e outra correspondendo uma pessoa sentada, aproximadamente 1,2 metro. Os medidores de nível sonoro ficaram localizados no meio do comprimento da barreira, que segundo os autores Jolibois et al. (2015), é onde a barreira tem o efeito mais importante.

Os pesquisadores fizeram uso do *software* *Micado*, com base no Método dos Elementos de Contorno (*Boundary Element Method* – BEM). Assim, a pesquisa concluiu que, embora, encontrou-se uma variabilidade significativa entre os diferentes bondes, é mostrado que a barreira fornece em média uma atenuação de mais de 10 dB.

Vale ressaltar que também foi avaliado o desempenho da barreira acústica no domínio da frequência, e, descobriram que, a barreira fornece atenuação sonora em toda a faixa de

frequência de 200 a 2500 Hz, que segundo os autores, é a faixa na qual o efeito da barreira pode ser avaliado com precisão, o que produz uma perda de inserção nessa faixa de 13 dB.

Alguns dos processos de pesquisa desenvolvidos na presente tese, encontra-se na mesma linha de pesquisa Arenas et al. (2017), no que diz respeito a um duplo aspecto ambiental. Por um lado, a reciclagem de um subproduto industrial e, por outro, a atenuação de ruído. O trabalho intitulado “*Development of a fly ash-based geopolymetric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers*”, teve como principal objetivo determinar e avaliar a aplicabilidade de um novo produto composto por um concreto geopolimérico à base de cinzas volantes com resíduos de construção e demolição como agregados, no campo das barreiras acústicas para rodovias. Para tanto, os autores analisaram as principais propriedades físicas, mecânicas e acústicas de um concreto geopolimérico à base de cinzas volantes. Desenvolveram uma matriz porosa com o intuito de absorver a energia sonora, usaram dois agregados diferentes, granito triturado e resíduos da construção e demolição.

Uma minuciosa revisão bibliográfica realizada pelos pesquisadores justifica a relevância do estudo, pois as estratégias políticas da Comissão Europeia para avançar para uma economia circular (desde o projeto do produto até à relação com as matérias primas e resíduos) prevê medidas para estimular mercados de materiais reciclados derivados de resíduos de construção e demolição (RCD). Haja vista que, a tendência no campo da construção é considerar o RCD como resíduo inerte a ser depositado em aterros e, em alguns casos, em aterros não controlados (ARENAS et al., 2017). Um dos problemas mais importantes do RCD é a sua composição muito heterogênea, contudo, em estudos anteriores de Arenas et al. (2013), o tamanho de partícula é o fator mais importante nas propriedades acústicas de concretos porosos, mais do que a composição química.

Ressaltando-se diretamente sobre as propriedades acústica, os autores Arenas et al. (2017), mediram o coeficiente de absorção sonora em um tubo de impedância seguindo o método da função de transferência descrito na norma ISO 10534-2, numa gama de frequências de 0 a 5000 Hz. O coeficiente de absorção sonora determinado no tubo de impedância fornece resultados precisos do comportamento acústico de painéis em escala industrial (ARENAS et al., 2017). Os autores afirmam, a partir dos resultados obtidos, que os resíduos de construção e demolição podem ser potencialmente reciclados, fabricando um concreto poroso que pode ser aplicado para a fabricação de anteparos, a fim de atenuar o ruído ambiental.

O Quadro 3 sintetiza algumas das referências exploradas, as quais estão relacionadas à esta pesquisa.

Quadro 3 – Estudos relacionados ao tema desta pesquisa.

Estudos sobre mapa de ruído ambiental		
Ano	Autores	Títulos
2008	Lee et al.	<i>Utilizing noise mapping for environmental impact assessment in a downtown redevelopment 88oef of Seoul, Korea</i>
2008	Chung et al.	<i>Comparison of traffic noise predictions of arterial roads using Cadna-A and SoundPlan noise prediction models</i>
2010	Karantonis et al.	<i>Further comparison of traffic noise predictions using the CadnaA and SoundPlan noise prediction models</i>
2011	Manvell; Banda	<i>Good practice in the use of noise mapping software</i>
2011	Zannin, Sant’Ana	<i>Noise mapping at 88oeficien stages of a freeway redevelopment 88oefici – A case study in Brazil</i>
2012	Hadzi-Nikolova	<i>Modeling and mapping of urban noise pollution with SoundPlan software</i>
2014	Garg; Maji	<i>A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications</i>
2014	Vogiatzis; Remy	<i>From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in 88oefic urban agglomerations in South Europe</i>
2015	Sorensen et al.	<i>Exposure to long-term air pollution and road traffic noise in relation to cholesterol: a cross-sectional study</i>
2016	Bodin et al.	<i>Road traffic noise, air pollution and myocardial infarction: a prospective cohort study</i>
2016	Monarca et al.	<i>Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile</i>
2017	Prezelj; Murovec	<i>Traffic noise modelling and measurement: Inter-laboratory comparison</i>
2018	Khan et al.	<i>Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques</i>
Tema sobre barreiras acústicas		
Ano	Autores	Títulos
1968	Maekawa	<i>Noise Reduction by Screens</i>
1971	Kurze; Anderson	<i>Sound Attenuation by Barriers</i>
1999	Horoshenkov et al.	<i>Scale modelling of sound propagation in a city street canyon</i>
2000	Thorsson	<i>Optimisation of low-height noise barriers using the equivalente sources method</i>
2006	Baulac	<i>Optimisation des protections anti-bruit routières de forme complexe (optimization of complex traffic noise barriers)</i>
2010	Joynt e Kang	<i>The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers</i>
2012	Koussa et al.	<i>Evaluation de la performance acoustique des protections antibruit innovantes utilisant des moyens naturels: application aux transports terrestres (evaluation of the acoustic efficiency of innovative noise barriers using natural means)</i>
2013	Arenas et al.	<i>Use of co-combustion bottom ash to design isso acoustic absorbing material for highway noise barriers</i>
2013	Koussa et al.	<i>Acoustic performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches</i>
2014	Hong e Jeon	<i>The effects of áudio – visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance</i>
2014	Gonçalves	<i>Atenuação sonora de barreiras acústicas</i>
2015	Jolibois et al.	<i>In situ measurement of the acoustic performance of a full scale tramway low height noise barrier prototype</i>
2017	Arenas et al.	<i>Development of a fly ash-based geopolymeric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers</i>

Fonte: Autora, 2019.

3 METODOLOGIA

Este capítulo contextualiza os métodos de pesquisa e os procedimentos aplicados para o desenvolvimento deste trabalho. Tem-se como propósito principal de entender o fenômeno de estudo e responder à seguinte pergunta de pesquisa: *Como atenuar o impacto sonoro em locais estratégicos, a fim de proteger áreas consideradas expostas a determinadas fontes de ruído, em específico, áreas universitárias próximas a vias de tráfego de veículos com fluxo contínuo?*

O conjunto de meios dispostos convenientes para alcançar o objetivo do estudo e, especialmente, para chegar a um conhecimento científico, baseia-se em um projeto de pesquisa que consiste na organização sistemática das diferentes etapas que compõe a estrutura do trabalho.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PEQUISA

Os métodos científicos caracterizam todas as ciências. Contudo, nem todos os ramos de estudo que utilizam os métodos são ciência (MARCONI; LAKATOS, 2010). Assim, pode-se afirmar que a aplicação de métodos científicos não é exclusivamente da ciência, porém não existe ciência sem a utilização de métodos científicos. O método é o conjunto de atividades sistemáticas e racionais que, proporciona uma direção específica aos procedimentos adotados em um projeto de pesquisa (CRESWELL, 2010; MARCONI; LAKATOS, 2010).

Entretanto, como toda a atividade, a pesquisa científica demanda que as práticas desenvolvidas ao longo do processo sejam realmente planejadas. Dessa forma, o planejamento é compreendido como sendo a primeira fase da pesquisa, onde envolve a formulação do problema, a definição dos objetivos, a elaboração da pergunta de pesquisa, a operacionalização dos conceitos, enfim, o planejamento concretiza-se mediante a construção de um projeto de pesquisa (GIL, 2009).

Como toda a ciência emprega diversas técnicas na obtenção de seus propósitos, neste estudo utilizou-se a técnica de pesquisa de campo, a qual consiste na observação e levantamento de fatos e fenômenos no próprio local onde ocorrem. De acordo com Markoni e Lakatos (2010), em primeiro lugar, a técnica de pesquisa de campo requer a realização de uma busca bibliográfica sobre o tema estudado. Haja vista que, a revisão bibliográfica servirá para o pesquisador se situar em que estado se encontra atualmente o problema, quais trabalhos já foram publicados a respeito do tema e quais são as opiniões dominantes sobre o assunto em questão.

Para este estudo a busca bibliográfica foi realizada em base de dados como o *Scopus Search*, *Scientific Electronic Library Online (SciELO)*, *Science Direct* e bibliotecas *online* que oferecem textos completos de livros, teses, dissertações e artigos científicos.

A pesquisa de campo engloba três grandes grupos de estudo: exploratórios, experimentais e quantitativos-descritivos (MARCONI; LAKATOS, 2010). Os dois primeiros grupos foram abordados neste trabalho. Na etapa exploratória, o pesquisador torna-se familiarizado com o ambiente, fato ou fenômeno relativamente desconhecido. Esse tipo de estudo, obtêm-se descrições tanto qualitativas quanto quantitativas do objeto de pesquisa, assim, o pesquisador deve conceituar as inter-relações investigadas no ambiente observado (MARCONI; LAKATOS, 2010).

O estudo exploratório foi uma etapa importante para o desenvolvimento da tese, pois a realidade sonora urbana constitui de medições de variáveis quantificadas numericamente para que possam ser comparadas após simulação computacional, concomitante em que são caracterizadas qualitativamente a partir da interpretação dos dados gerados.

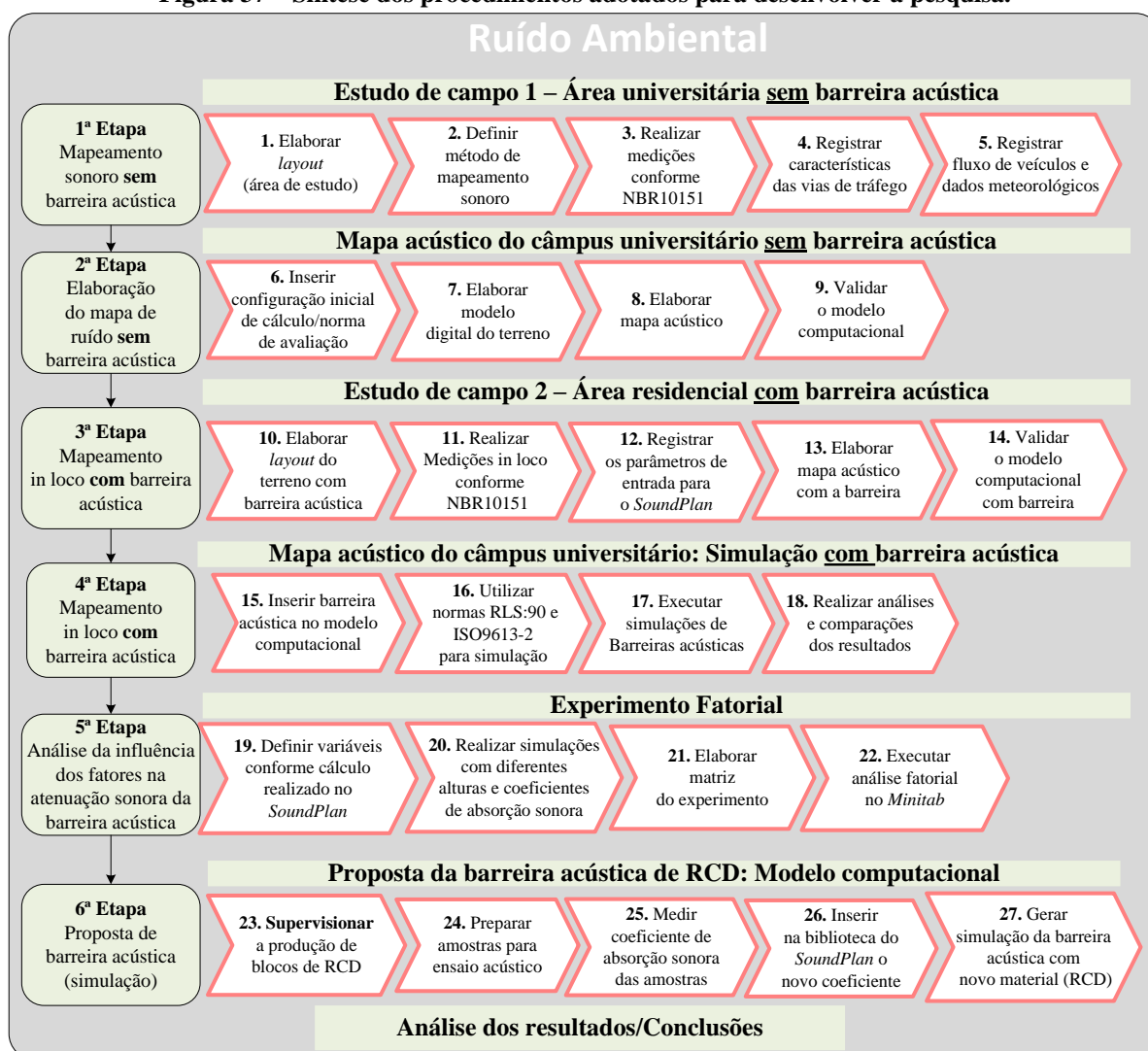
O estudo experimental, segundo Markoni e Lakatos (2010), pode ser elaborado tanto em campo, ambiente natural, quanto em laboratório, ambiente totalmente controlado. Essa etapa de estudo experimental forneceu suporte para a produção de blocos de concreto, bem como para o ensaio acústicos das amostras de concreto, medidas necessárias ao estudo final.

3.2 PROCEDIMENTOS ADOTADOS PARA DESENVOLVER A PESQUISA

A partir da teoria do método de pesquisa, aplicou-se os procedimentos que estão sintetizados na Figura 37. Segundo Yin (2010), para a condução de um trabalho é necessário definir uma estratégia de pesquisa pautada em sequência de atividades a serem realizadas.

Para este estudo foram selecionadas duas áreas urbanas situadas na cidade de Curitiba, Paraná, Brasil. Nas áreas em questão, encontra-se duas edificações distintas, em uma área está instalada a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, denominada neste trabalho como câmpus universitário, e a outra área, está instalada um conjunto residencial horizontal. O comum entre essas duas áreas é que ambas estão localizadas em campo aberto próximas às vias de tráfego veicular, porém, o que as diferenciam é a existência de barreira acústica. O câmpus não possui barreira acústica e a área residencial tem uma barreira acústica de grande extensão construída.

Figura 37 – Síntese dos procedimentos adotados para desenvolver a pesquisa.



Fonte: Autora (2019).

O período de estudo de campo para levantamento de dados como: identificação da área, levantamento das características de vias de tráfego veicular, mapeamento de nível sonoro e registros de dados meteorológicos, ocorreu em abril de 2017 na área sem barreira acústica (câmpus universitário) e em abril de 2018, realizou-se o estudo da área com barreira acústica (área residencial).

No decorrer do desenvolvimento da tese foram realizados os demais procedimentos, tais como: configuração do *software* de mapeamento de ruído, elaboração do modelo digital do terreno, elaboração do mapa acústico, simulação de barreira acústica com material disponível na biblioteca do *software SoundPlan*[®], versão 7.4, supervisão da produção de blocos de concreto, preparação de amostras para ensaio acústico e, por fim, simulação de barreira acústica a partir do coeficiente de absorção sonora das amostras produzidas no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A seguir estão detalhadas todas as etapas e os procedimentos que foram necessários para o desenvolvimento da tese.

3.3 PRIMEIRA ETAPA: MAPEAMENTO DE NÍVEL SONORO SEM BARREIRA ACÚSTICA

Nesta seção, estão apresentados os procedimentos utilizados no estudo de campo para realizar a coleta de dados. A pesquisa nessa fase obteve, tanto quanto possível, a compreensão das variáveis que exercem influência na situação que constitui o objeto de estudo.

3.3.1 Primeira Área de Estudo: Câmpus Universitário

Na primeira etapa elaborou-se a geometria da área de estudo. Para tanto foi necessário o levantamento da região em questão, no que diz respeito à localização (zona de uso), conforme norma técnica e legislação municipal. De acordo com a norma NBR 10151:2000 (Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade), quanto ao tipo de área o câmpus universitário está localizado em uma área mista, predominantemente residencial. O artigo 5º, parágrafo 3º da Lei Municipal Ordinária de Curitiba nº. 10625:2002, destaca que independentemente da área de uso, quando a propriedade que sofre incômodo sonoro tratar de escola, biblioteca ou similar, devem ser atendidos os limites sonoros estabelecidos para ZR-1 (zona residencial), e deve ser observado o raio de 200m (duzentos metros) de distância, definida como zona de silêncio. Tanto a norma nacional, quanto a legislação municipal definem para a área de estudo o limite máximo de pressão sonora para o período diurno (L_d) de 55 dB.

O Quadro 4 apresenta o nível de critério de avaliação (NCA) para ambientes externos, em dB, o qual consta na NBR10151:2000. A norma fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independentemente da existência de reclamações.

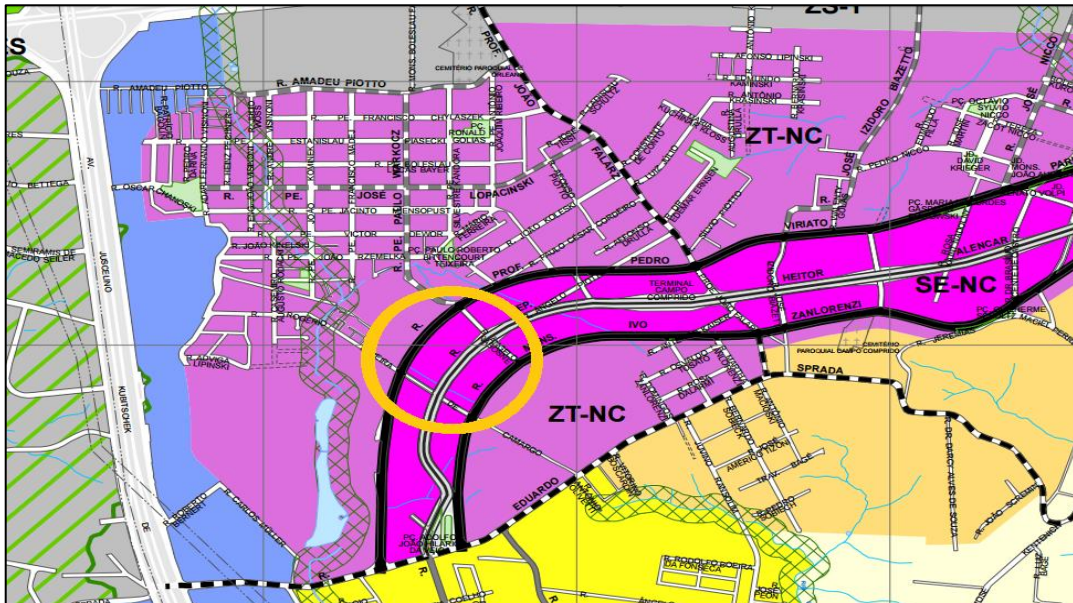
Quadro 4 – Nível de critério de avaliação para ambientes externos.

Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB		
Tipos de áreas	Diurno	Noturno
Áreas de sítios e fazendas	40	35
Área estritamente residencial urbana ou de hospitais ou de escolas	50	45
Área mista, predominantemente residencial	55	50
Área mista, com vocação comercial e administrativa	60	55
Área mista, com vocação recreacional	65	55
Área predominantemente industrial	70	60

Fonte: BRASIL, 2000.

A Figura 38 mostra a localização da UTFPR, destacada por um círculo, conforme o zoneamento disponível pelo IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba).

Figura 38 – Localização do câmpus universitário. SE-NC Setor Especial Nova Curitiba. ZT-NC Zona de Transição Nova Curitiba.



Fonte: Adaptado do IPPUC (2016).

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, está instalada em uma área de 59.000 m² com 24.500 m² de área construída, compreendendo salas de aula, laboratórios, salas de atividades específicas, administração, biblioteca e restaurante universitário. O câmpus está separado pela Rua Deputado Heitor Alencar Furtado e delimitado pelas ruas Professor Pedro Viriato Parigot de Souza, Rua Ângelo Nabsone, Rua Rogério Pereira de Camargo e Rua Monsenhor Ivo Zanolrenzi, conforme apresenta a Figura 39.

Figura 39 – Câmpus universitário de Curitiba.



Fonte: Autora (2018).

3.3.2 Elaboração das Geometrias das Áreas de Estudo

A região onde está instalada o câmpus universitário apresenta uma topografia sem grandes variações, compreendida entre 945 metros e 954 metros em relação ao nível do mar.

Para facilitar o processo de elaboração das geometrias dos terrenos, utilizou-se os mapas disponibilizados pelo IPPUC (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba). O instituto IPPUC disponibiliza arquivos individuais que contém os dados cartográficos de Curitiba, sendo um arquivo de altimetria das curvas de nível, um arquivo de arruamento e um arquivo de loteamento, compilados em 2015 e 2017.

Para obter-se um único mapa da área de estudo foi necessário sobrepor os mapas individuais e extrair somente a área de interesse para gerar o cálculo e simulação de nível de pressão sonora no *software SoundPlan*.

Por conseguinte, para a elaboração dos *layouts* das áreas de estudo, utilizou-se o *software AutoCAD 2016*® (versão *student*). Nesta etapa, os *layouts* tiveram como finalidade a inserção das curvas de nível equidistantes a 1 metro, a localização e dimensões das edificações (blocos acadêmicos e demais edifícios e casas), vias de tráfego, viaduto, semáforos e, ainda, caracterizar as fontes fixas de ruído, como por exemplo, estações de energia, exaustores, compressores, locais de concentrações de pessoas como refeitório, ginásio de esporte e estacionamentos, conforme destacado na Figura 40.

Figura 40 – Layout da área de estudo, câmpus universitário.



Legenda:					
950	Curvas de nível	⊙	Ponto receptor	—	Rua
	Edificação principal (UTFPR)		Ponto de energia (baixa tensão)		Semáforo
	Edificações diversas		Refeitório (exaustor)		Viaduto
Área de estudo: Câmpus universitário sem barreira acústica			Sem escala		

Fonte: Adaptado do IPPUC (2018).

Quanto à altura dos edifícios, aplicou-se o critério recomendado pela Agência Portuguesa do Ambiente (2011), na ausência de dados concretos relativos à altura dos edifícios existentes nas zonas em estudo (como é o caso), obteve-se informação durante os levantamentos de campo de forma a permitir o número de pisos para cada edificação, o qual foi multiplicado por três metros (altura média de um pé direito dos prédios). Para casas, adotou-se três metros, e sobrados seis metros.

3.3.3 Métodos de Mapeamento de Ruído

Nesta seção, definiu-se os medidores de níveis sonoros e o método de avaliação *in loco*, de acordo com norma vigente NBR 10151:2000 (Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade).

3.3.4 Definição dos Equipamentos de Medição de Nível Sonoro

Conforme ilustrados na Figura 41, os medidores de níveis sonoros (sonômetros) utilizados nesta pesquisa foram o modelo *B&K 2250 Light*, classe 1, da marca *Brüel&Kjaer* e o modelo DEC-5010, classe 2, da marca *Instrutherm*.

O medidor DEC-5010 foi utilizado simultaneamente e no mesmo local (câmpus universitário) com o *B&K 2250 Light*, para ter uma comparação das medições obtidas por cada sonômetro, com o intuito de verificar a viabilidade de utilização do medidor classe 2 na área de estudo, mais especificamente, na área residencial horizontal.

Os sonômetros, encontravam-se calibrados e certificados por empresa cadastrada na Rede Brasileira de Calibração (RBC) e devidamente de acordo com a norma *International Electrotechnical Commission*. Os medidores foram ajustados antes e após cada série de medições, com calibrador acústico da marca *Brüel&Kjaer*.

Figura 41 – Sonômetros utilizados para obter dados de níveis sonoros. Lado esquerdo: analisador modelo B&K 2250 Light, classe 1. Lado direito: analisador modelo DEC-5010, classe 2.



Fonte: Autora (2018).

Os medidores foram ajustados para medição de nível de pressão sonora equivalente ponderado em “A” [L_{Aeq} , dB], lido em resposta rápida (*Fast*). O analisador B&K 2250 *Light*, também foi configurado para obter-se as seguintes grandezas acústicas: valor máximo observado (L_{max}); valor mínimo observado (L_{min}), níveis percentis (L_{10} e L_{90}), além do nível sonoro equivalente (L_{Aeq}).

Os valores obtidos ao longo dos vinte e dois pontos de medições estão expostos no Quadro 5 e na Figura 42.

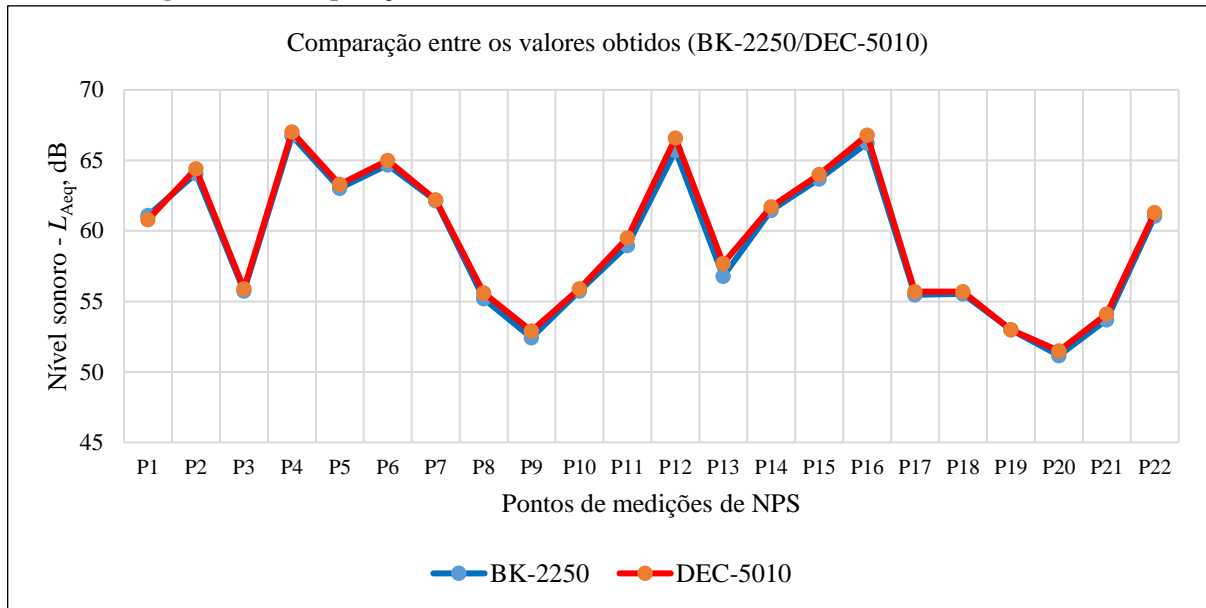
Quadro 5 – Diferenças entre os valores obtidos com os sonômetros Classe1 e Classe 2.

Comparação de nível de pressão sonora entre os sonômetros “Classe 1/Classe 2”							
[L_{Aeq} , dB]							
Pontos de medição	BK-2250	DEC-5010	Diferença	Pontos de medição	BK-2250	DEC-5010	Diferença
P1	61,09	60,8	0,3	P12	65,71	66,6	0,9
P2	64,08	64,4	0,3	P13	56,78	57,7	0,9
P3	55,73	55,9	0,2	P14	61,45	61,7	0,3
P4	66,74	67,0	0,3	P15	63,68	64	0,3
P5	63,02	63,3	0,3	P16	66,23	66,8	0,6
P6	64,68	65,0	0,3	P17	55,47	55,7	0,2
P7	62,15	62,2	0,1	P18	55,53	55,7	0,2
P8	55,2	55,6	0,4	P19	52,99	53	0,0
P9	52,42	52,9	0,5	P20	51,16	51,5	0,3
P10	55,74	55,9	0,2	P21	53,69	54,1	0,4
P11	58,96	59,5	0,5	P22	61,04	61,3	0,3

Fonte: Autora (2018).

Nota-se a partir da Figura 42, que há uma concordância, diferenças não superiores a 1 dB, o que possibilita a utilização do medidor de nível de pressão sonora classe 2, assim como, preconiza a norma NBR 10151:2000, no item 4 “equipamentos de medição”, que refere-se ao sistema de medição, o qual deve cumprir os requisitos tanto para o medidor de classe 1, quanto para o medidor classe 2.

Figura 42 – Comparação de valores obtidos com os sonômetros Classe 1 e Classe 2.



Fonte: Autora (2018).

3.3.5 Técnicas Aplicadas para Realizar o Mapeamento Sonoro *in loco*

Como relatado anteriormente, as medições de ruído ambiental foram realizadas de acordo com as recomendações prescritas pela norma NBR 10151:2000. Com base nas orientações, os medidores de nível de pressão sonora foram posicionados a uma altura de 1,20 (um metro e vinte centímetros) do chão e com uma distância de aproximadamente 2 (dois) metros afastados de paredes e/ou superfícies que pudessem refletir de alguma forma as ondas sonoras, conforme ilustra a Figura 43.

Figura 43 – Sonômetros afastados 2 metros da parede e com altura de 1,20 metro do solo.



Fonte: Autora (2018).

Foram determinados dias típicos para realizar as medições de nível de pressão sonora, sendo no período da manhã, durante a ocorrência das aulas, nos dias de terça-feira, quarta-feira e quinta-feira, entre 08h e 11h30, período ainda considerado com alto volume de tráfego, conforme dados repassados pela SETRAN (Secretária Municipal de Trânsito). A duração do tempo de cada medição de ruído e a contagem volumétrica do fluxo de veículos foram agrupadas em períodos de 15 (quinze) minutos, simultaneamente.

3.3.6 Registrar as Características das Vias de Tráfego de Veículos

Para alimentação (parâmetros de entrada) do *software* foi necessário registrar as características das vias de tráfego, como por exemplo, tipo de superfície das vias (estado e conservação), canteiros centrais, direção do fluxo de veículos, velocidade da via e número de faixa de rolamento.

3.3.7 Registrar Fluxo de Veículos

Para o registro do volume de tráfego veicular utilizou-se a “ficha de contagem volumétrica II” do manual de estudo de tráfego do DENIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), a qual facilita a caracterização de cada tipo de veículo (leves e pesados). A categoria dos veículos foi registrada conforme solicita a norma alemã RLS:1990, sendo veículos pesados aqueles com peso acima de 2,8 toneladas, considerando os micro-ônibus, ônibus e caminhões. Os veículos leves por sua vez, são os automóveis em geral e as motocicletas. Para diminuir a margem de erro da contagem de veículos das principais vias fez-se o uso de filmagens.

3.3.8 Dados Meteorológicos

Durante as medições dos níveis de pressão sonora, a monitoração das grandezas meteorológicas foi efetuada recorrendo ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As informações podem ser acessadas a partir do banco de dados disponibilizado pelo Instituto (INMET) para a estação A807, localizada na cidade de Curitiba. As grandezas meteorológicas registradas foram a temperatura (°C), a umidade relativa do ar (%), a velocidade do vento (m/s) e a pressão atmosférica (hPa).

Até este momento da pesquisa, todos os procedimentos aplicados no estudo de campo serviram para obter um banco de dados, o quais são parâmetros de entrada para modelagem computacional, geração de cálculos, validação do mapa gráfico e simulação de barreira acústica.

3.4 SEGUNDA ETAPA: ELABORAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL SEM BARREIRA ACÚSTICA

Nesta seção, encontram-se descritos os processos necessários para elaborar o mapa de ruído e a simulação da barreira acústica no programa *SoundPlan*[®], versão 7.4.

3.4.1 Modelagem Computacional das Áreas de Estudo

Os arquivos elaborados no *AutoCAD* 2016[®] foram importados no *software* de simulação, para a elaboração do mapa de ruído. Nesta etapa, primeiramente, é necessário configurar alguns dados, como por exemplo, sistemas de coordenadas padrão, normas para cálculo de ruído ambiental, método de cálculo e sistema de avaliação de ruído, intervalo de tempo e configuração de altura e afastamento dos pontos receptores (*Default coordinate system, standards/assessment, time slices for road, Geo-Database*).

Os sistemas de coordenadas são referentes aos pontos georreferenciados, normalmente, em coordenadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*, utiliza um sistema de coordenadas cartesianas bidimensional para dar localizações na superfície da Terra), as quais estão vinculadas ao Sistema Geodésico Brasileiro, sendo necessário configurar no *SoundPlan*, o SIRGAS (*South America*), *geocentric*, GRS80. A norma alemã RLS:1990 (*Richtlinien für den Larmschutz isso Straßen*), a qual faz parte do banco de dados do *software*, é o método padrão utilizado para previsões de ruído de tráfego na Alemanha, sendo esta norma selecionada para o cálculo de ruído do presente estudo.

Algumas pesquisas realizadas no Brasil utilizaram a norma alemã RLS:1990, como por exemplo, a pesquisa de Calixto (2002), destaca que a norma RLS:1990 foi considerada aplicável ao estudo de ruído ambiental nas “rodovias-grandes avenidas” situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba. O pesquisador Quadros (2004), verificou a aplicabilidade da norma alemã RLS:1990 e considerou válida após ter sido aplicada à análise da qualidade ambiental do ruído gerado por veículos de utilidade pública, na cidade de Curitiba. A pesquisa de Nardi (2008), utilizou a norma RLS:1990 para avaliar o ruído ambiental urbano na área

central da cidade de Florianópolis, Santa Catarina. Para previsões práticas da perda de inserção da barreira de acústica, o programa disponibiliza a norma ISSO 9613-2:1996, que descreve um método geral de cálculo da atenuação do ruído durante a propagação ao ar livre.

Quanto ao processo de medições para validação e avaliação sonora adotou-se os procedimentos da norma NBR 10151:2000, a qual foi configurada na base de dados do programa, não necessariamente precisa ser configurada, permanecendo a critério do pesquisador. A opção “*assessment*” (avaliação), que faz parte da configuração inicial do *software*, permite informar quais são os limites do nível sonoro para cada área de uso definida, como por exemplo, nesta pesquisa foi adotado o seguinte: para configuração da avaliação foi o período diurno das 07 horas às 22 horas, neste intervalo definiu-se para avaliar somente a duração do tempo de medição, o qual foi das 08h às 11h30 ($Ta[h] = 3h30$). Sendo esta, uma das maneiras de calibrar o modelo computacional. A Tabela 7 ilustra as principais configurações básicas para iniciar o cálculo por meio da modelagem tridimensional.

Tabela 7 – Configurações iniciais do programa.

Sistemas de coordenadas (pontos georreferenciados)	Coordenadas UTM
Sistemas de referência (Sistema Geodésico Brasileiro)	Sistema Geodésico Brasileiro: SIRGAS – GRS80
Método de cálculo de nível sonoro	Norma alemã RLS:1990
Norma para avaliação e validação do mapa	Norma NBR10151:2000
Norma para cálculo da perda inserção de barreira	ISO 9613-2:1996
Período de avaliação	L_d (7h-22h)
Duração do tempo de medição	Horas: 08h às 11h30 (hrs/ Ta [h]: 3h30)
Altura do receptor localizado acima do solo	1,2 metro
Distância do receptor em relação à fachada	2 metros
Altura dos andares da edificação em avaliação	3 metros

Fonte: Autora (2018).

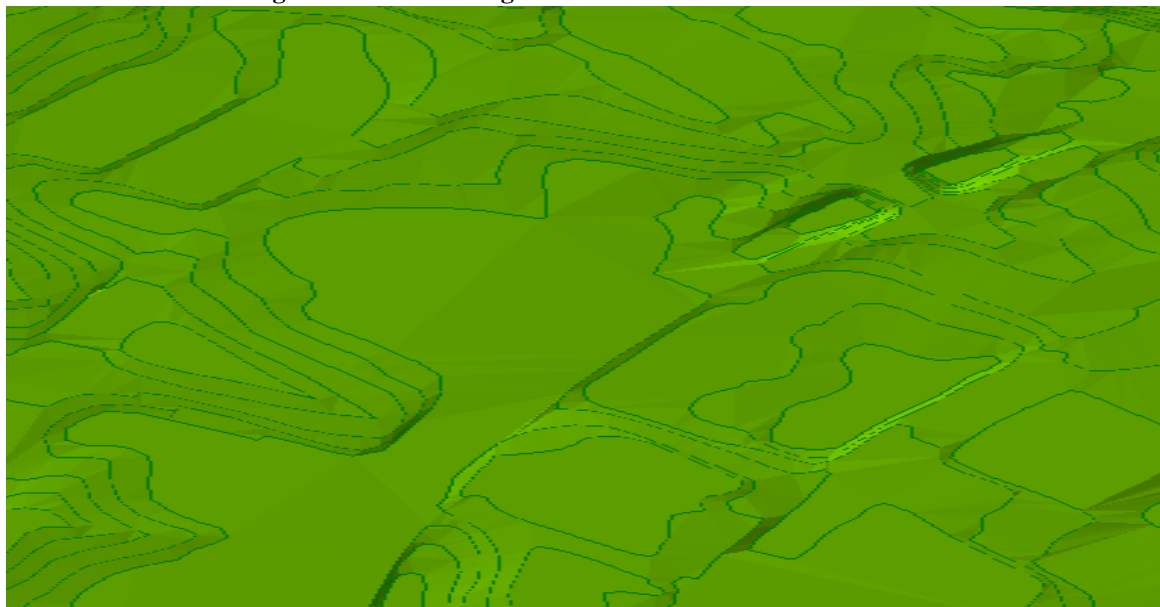
3.4.2 Parâmetro de Entrada para Elaborar o Modelo Digital do Terreno

Neste processo, após as configurações iniciais do *software* o principal dado de entrada é a representação das curvas de nível, as quais devem ser importadas devidamente cotadas, ou seja, as linhas de elevações precisam ser referenciadas em relação ao nível do mar, assim, os demais objetos (edificações, vias, viadutos, receptores, representação da barreira acústica, etc) serão localizados sob a superfície após o cálculo gerado do DGM (*Digital Ground Models*) no módulo *Geo-Database*.

No processo de elaboração dos *layouts*, apresentados anteriormente, foi inserido no projeto da área de estudo a topografia do terreno com suas devidas curvas de nível, cotadas de um em um metro, para gerar o modelo digital do terreno (*Digital Ground Models – DGM*),

assim, as curvas de nível foram convertidas em objeto “linha de elevação” (*elevation line*). A Figura 44 apresenta a topografia do terreno após gerar o cálculo do DGM (*Digital Ground Models*).

Figura 44 – Modelo digital do terreno da área universitária.



Fonte: Autora (2018).

Após o cálculo gerado do modelo digital do terreno, todos os demais objetos (edificações, pontos receptores, vias de tráfego com suas larguras e faixas de rolamento, semáforos, canteiros centrais e estacionamentos), foram importados do programa *AutoCAD 2016*[®] (versão *student*), para o *software SoundPlan*.

3.4.3 Elaboração do Mapa Acústico: Representação Gráfica do Ruído de Ambiente Externo

Na sequência da elaboração do modelo computacional foi necessário definir uma área de cálculo, a qual tem a função de delimitar a área de simulação, com o intuito de reduzir o tempo de simulação e geração do mapa de ruído em relação ao plano horizontal (*Grid Noise Map*).

A partir da delimitação da área, segue-se para o cálculo, o qual gera uma malha dos pontos receptores, neste caso, pode ser definido pelo próprio usuário, adotou-se neste estudo uma malha de cálculo de 10x10 metros. Valores de 15x15 metros e 20x20 metros foram testados, porém, notou-se vantagem somente na rapidez de processamento de cálculo, tendo como desvantagem os detalhes dos resultados dos cálculos. Nesta etapa, ocorreu-se o processo de validação do modelo computacional, ou seja, a comparação entre os resultados *in loco* e os resultados simulados.

3.4.4 Validação do Modelo Computacional: Mapa acústico

O procedimento metodológico aplicado nas medições *in loco* é essencial para ser aplicado nesta etapa, a qual se procede a uma validação dos resultados dos níveis sonoros. Uma vez que o cálculo realizado se reporta a intervalos de tempo, de curta ou longa duração, as simulações sonoras para efeito de validação devem ser representativas às medições, assim, os bancos de dados levantados na etapa de mapeamento *in loco* (primeira etapa) deve permitir validar o comportamento do modelo.

Nesta fase é preciso informar à base de dados do *software* os procedimentos de medições. Neste caso, aplicaram-se os procedimentos da norma NBR 10151:2000, ou seja, a grandeza de avaliação sonora – L_{Aeq} , o período de avaliação (início e fim – L_d), neste trabalho foram em média três horas e trinta minutos para cada série de medições – $T_a[h]$, o limite máximo de nível sonoro permitido e a área de uso, adotada nesta pesquisa como área escolar com um limite máximo de 55 dB. Também é importante entrar com as variáveis meteorológicas registradas nos dias de medições *in loco*, como a umidade relativa do ar, a temperatura e a pressão atmosférica.

3.5 TERCEIRA ETAPA: MAPEAMENTO DE NÍVEL SONORO COM BARREIRA ACÚSTICA

Os procedimentos adotados anteriormente para obter um banco de dados, para alimentar o *software*, são os mesmos aplicados nesta terceira etapa da pesquisa. No entanto, nesta seção, leva-se em consideração a avaliação de atenuação sonora de barreira acústica em uma situação real.

3.5.1 Avaliação de Atenuação Sonora de uma Barreira Acústica em um Cenário Real

A área onde foi realizada a avaliação de atenuação sonora, proporcionada por barreira acústica, está localizada as margens de uma via de tráfego intenso de veículos, na cidade de Curitiba, Estado do Paraná. A barreira com altura de 3 metros (três metros), construída a partir de blocos de concreto, está implementada em uma lateral extensa de uma área residencial horizontal.

Atualmente a área residencial faz divisa com um hipermercado, o qual recebe caminhões para carga e descarga, no período diurno. Sendo este o fato que levou a implementação da

barreira acústica, devido aos reclamantes, moradores da área residencial, exporem os problemas que surgiram por causa de incômodo referente ao nível sonoro elevado proveniente pelo fluxo de caminhões que abastece o hipermercado.

Pode-se observar por meio da Figura 45A, que a providência tomada após as reclamações foi a implementação de uma barreira acústica na linha de visão entre a fonte de ruído e o receptor, desse modo, interrompendo a transmissão direta do som. A barreira, construída a partir de blocos de concreto apresenta formas de um sistema absorvedor, com intuito de dissipar a energia sonora por meio de cavidades, eliminando a reflexão da onda sonora.

A barreira acústica em avaliação tem extensão de aproximadamente 100 metros (cem metros), sendo considerada barreira infinita, o que garante que não há prejuízo quanto à atenuação sonora devido à difração que poderia ocorrer pelas bordas laterais da barreira.

Nas demais laterais, da área residencial, encontra-se contornada por um muro de alvenaria com 2,8 metros (dois metros e oitenta centímetros) de altura, o qual também passou por avaliação de atenuação sonora na fronteira com a barreira acústica (Figura 45B).

Figura 45 – Barreira acústica de um cenário real. A) Barreira acústica de bloco de concreto. B) Muro de alvenaria na fronteira com a barreira acústica.



Fonte: Autora (2018).

A avaliação do desempenho da barreira acústica consiste na comparação dos níveis sonoros registados por dois sonômetros, conforme ilustra a Figura 46. Os medidores de nível de pressão sonora, modelo DEC-5010, classe 2, da marca *Instrutherm*, foram posicionados a uma altura de 1,2 metro do chão e com uma distância de aproximadamente 2 metros afastados de paredes e/ou superfícies que pudessem refletir de alguma forma as ondas sonoras.

Os medidores foram ajustados para medição de nível de pressão sonora equivalente ponderado em “A” (L_{Aeq}), lido em resposta rápida (*Fast*), conforme recomendações da norma técnica NBR 10151:2000.

Figura 46 – Análise de desempenho de barreira acústica. A) Barreira acústica, face exposta à fonte de ruído (via de tráfego). B) Muro de alvenaria, face oposta à geração de ruído (lado voltado ao receptor).

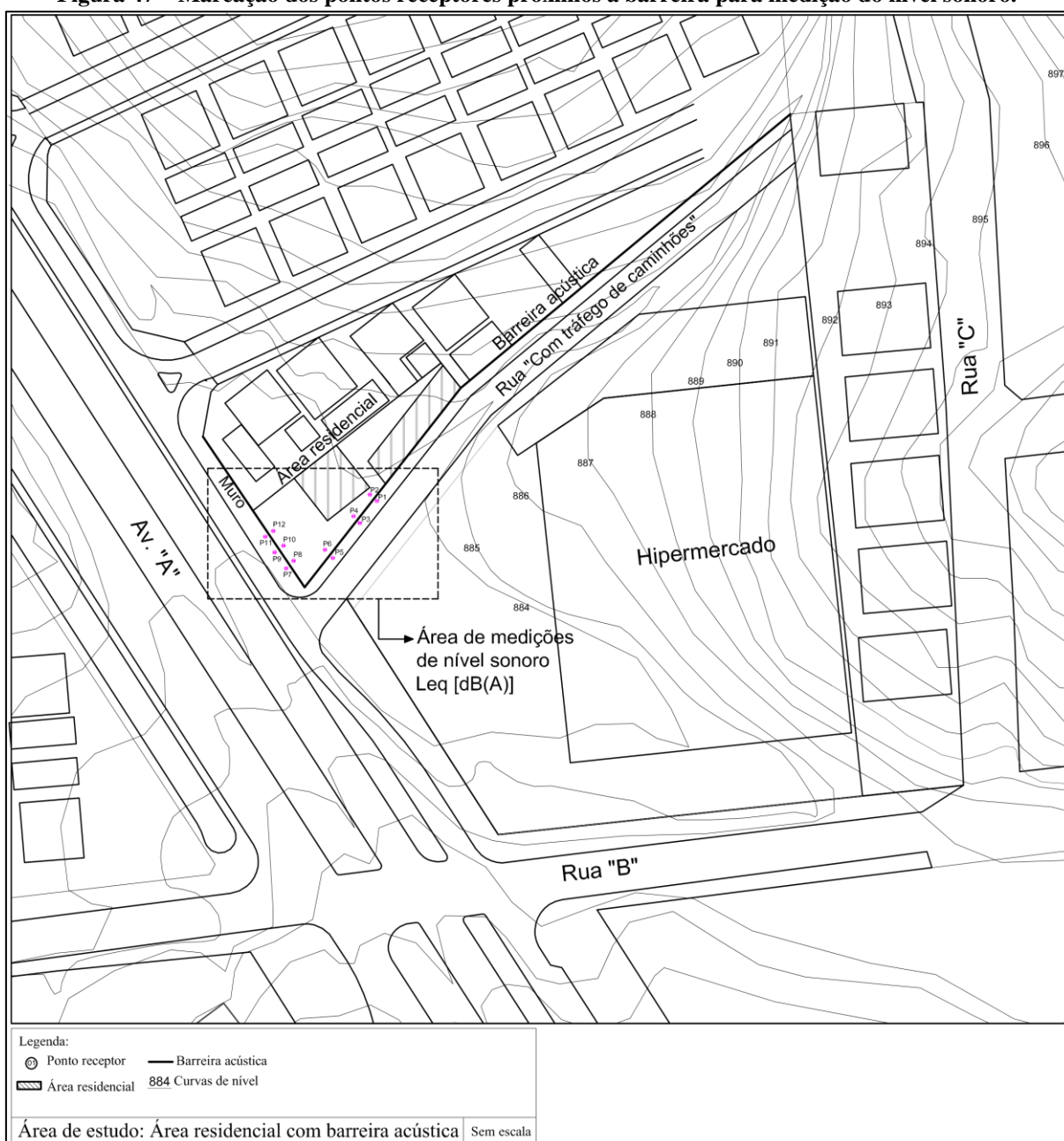


Fonte: Autora (2018).

Na parte externa e interna da área residencial marcou-se a posição dos pontos receptores, no total de 12 (doze) pontos receptores para realizar as medições de nível sonoro. No mesmo alinhamento com o lado interno foram posicionados os receptores do lado externo, ou seja, frente à barreira (face voltada ao ruído) e atrás da barreira (face oposta ao ruído), conforme apresentado na Figura 47, o *layout* da área em avaliação.

Todos os procedimentos aplicados no estudo de campo serviram para obter um banco de dados, o quais são parâmetros de entrada para modelagem computacional, geração de cálculos, simulação de barreira acústica e validação do mapa de ruído.

Figura 47 – Marcação dos pontos receptores próximos à barreira para medição do nível sonoro.



Fonte: Autora (2018).

3.5.2 Elaboração do Modelo Computacional do Cenário Real com Barreira Acústica

Nesta etapa, realizou-se a modelagem do terreno para proceder ao cálculo de nível sonoro e apresentá-lo por meio de mapa acústico. Este foi um processo importante, pois com o objetivo de validar o modelo de cálculo, procedeu-se à comparação dos níveis sonoros medidos *in loco*.

Com os níveis sonoros obtidos por simulação para o mesmo local, considerou-se o volume de tráfego (veículos leves e pesados), com as correspondentes velocidades médias das

vias observadas, assim como as demais variáveis que interferem para a propagação de ruído (temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento).

Quanto ao cálculo de absorção sonora da superfície da barreira acústica, utilizou-se o material disponível na biblioteca do *software*, o qual corresponde ao material do cenário real, sendo caracterizado como blocos de concreto vazados (cavidades não preenchidas) e não pintados. Para o cálculo de absorção sonora do muro que faz fronteira com a barreira acústica, também, empregou-se o material da base de dados da biblioteca do programa, sendo este caracterizado com coeficiente de absorção de alvenaria. A Figura 48 apresenta a modelagem do terreno com as respectivas edificações e a implementação da barreira acústica.

Figura 48 – Modelagem de barreira acústica de um cenário real.



Fonte: Autora (2018).

3.6 QUARTA ETAPA: SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA PARA O CÂMPUS UNIVERSITÁRIO

A simulação do modelo computacional da área universitária foi dividida em duas etapas. A primeira, elaboração do mapa de ruído, a segunda, simulação da barreira acústica. O modelo tridimensional foi elaborado para atender as duas etapas de simulação.

A simulação de barreira acústica, teve como objetivo analisar o desempenho de atenuação sonora da barreira. Neste processo, inseriu-se as configurações da barreira no modelo computacional, tendo como parâmetros de entrada o comprimento, a altura, e o tipo de material, sendo este último definido pelo coeficiente de absorção sonora.

Por conseguinte, obteve-se dois cenários distintos, o primeiro sem a barreira acústica e o segundo com a barreira, podendo assim, realizar uma comparação dos níveis de pressão

sonora incidentes nos pontos receptores. Logo, possibilitou-se observar o comportamento sonoro após a inserção da barreira acústica no modelo tridimensional.

3.6.1 Análise dos Dados Obtidos

Os dados coletados *in loco* e os simulados foram tabulados em planilhas eletrônicas no *software Excel*. A apresentação dos resultados dos níveis de pressão sonora e da atenuação da barreira acústica foi separada por ponto receptor de medição, totalizando 22 pontos receptores no câmpus universitário, e 12 pontos receptores na área residencial, os quais estão discutidos e apresentados na sequência.

Após a tabulação dos dados, realizou-se a comparação dos níveis pressão sonora coletados na prática com os níveis sonoros simulados. Paralelamente, foram analisados os níveis sonoros obtidos com os valores preconizados pela norma NBR 10151:2000. Assim sendo, observou-se o quanto a poluição sonora, nas áreas em estudo, está acima do limite máximo permitido.

Quanto aos resultados da inserção da barreira acústica, os dados foram tabulados para ter uma comparação das áreas estudadas, com e sem a proteção entre a fonte emissora e o receptor. Até momento da pesquisa, o estudo apresenta os resultados realizados em campo, ao ar livre, sem a existência de uma barreira, apenas, realizou-se a predição de atenuação para o câmpus universitário. No entanto, na sequência, os resultados apresentados são referentes ao estudo de campo realizado em uma área, ao ar livre, onde há uma barreira acústica construída, ou seja, um cenário real para avaliar a atenuação sonora. O intuito principal deste processo é validar a aplicabilidade de um modelo computacional (simulação de barreira acústica) a partir de uma situação real.

3.7 QUINTA ETAPA: EXPERIMENTO FATORIAL

Dentre as possíveis variáveis, optou-se neste estudo realizar o experimento fatorial com os fatores “altura da barreira” e “coeficiente de absorção sonora do material”, tendo o intuito de encontrar a resposta média para atenuação sonora com a inserção da barreira acústica. Para tanto, elaborou-se uma matriz de planejamento fatorial composta por 2 fatores, 4 combinações, 9 réplicas e 36 experimentos, portanto, um planejamento fatorial 2^2 .

A matriz do planejamento experimental, encontra-se com ambos os níveis codificados em (-1) e (+1), conforme apresentado no Quadro 6. Os nomes dos fatores estão representados

pelas siglas “X1 e X2”, e a resposta das simulações pela sigla “y”. A sigla “X1” representa o coeficiente de absorção sonora do material (α : 0,2 e 0,5), a sigla “X2” representa a altura da barreira acústica (H: 2 e 4 metros), e “y” é a resposta da simulação acústica para obter a atenuação sonora. Realizou-se a análise fatorial em planilha eletrônica do *software Minitab*.

Para atender aos requisitos da análise fatorial, realizou-se simulações de barreira acústica no *software SoundPlan* com as seguintes configurações:

1ª simulação: barreira com 2 metros de altura e coeficiente de absorção α 0,2;

2ª simulação: barreira com 2 metros de altura e coeficiente de absorção α 0,5;

3ª simulação: barreira com 4 metros de altura e coeficiente de absorção α 0,2;

4ª simulação: barreira com 4 metros de altura e coeficiente de absorção α 0,5.

Quadro 6 – Matriz experimental.

Planejamento para executar o experimento fatorial							
Experimento	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Ordem	Corrente	Ponto central	Blocos	X1	X2	Resposta da simulação
1	1	1	1	1	-1	-1	y
2	2	2	1	1	1	-1	y
3	3	3	1	1	-1	1	y
4	4	4	1	1	1	1	y
5	5	5	1	1	-1	-1	y
6	6	6	1	1	1	-1	y
7	7	7	1	1	-1	1	y
8	8	8	1	1	1	1	y
9	9	9	1	1	-1	-1	y
10	10	10	1	1	1	-1	y
11	11	11	1	1	-1	1	y
12	12	12	1	1	1	1	y
13	13	13	1	1	-1	-1	y
14	14	14	1	1	1	-1	y
15	15	15	1	1	-1	1	y
16	16	16	1	1	1	1	y
17	17	17	1	1	-1	-1	y
18	18	18	1	1	1	-1	y
19	19	19	1	1	-1	1	y
20	20	20	1	1	1	1	y
21	21	21	1	1	-1	-1	y
22	22	22	1	1	1	-1	y
23	23	23	1	1	-1	1	Y
24	24	24	1	1	1	1	y
25	25	25	1	1	-1	-1	y
26	26	26	1	1	1	-1	y
27	27	27	1	1	-1	1	y
28	28	28	1	1	1	1	y
29	29	29	1	1	-1	-1	y
30	30	30	1	1	1	-1	y
31	31	31	1	1	-1	1	y
32	32	32	1	1	1	1	y
33	33	33	1	1	-1	-1	y
34	34	34	1	1	1	-1	y
35	35	35	1	1	-1	1	y
36	36	36	1	1	1	1	y

Fonte: Autora (2019).

Após o término da pesquisa realizada em campo e do modelo computacional, apresenta-se a proposta de simulação para analisar a atenuação sonora de barreira acústica de blocos de concreto de resíduos da construção e demolição (RCD), sendo este o diferencial da tese.

3.8 SEXTA ETAPA: PROPOSTA DE BARREIRA ACÚSTICA DE BLOCO DE RCD – MODELO COMPUTACIONAL

Por fim, sexta e última etapa para o desenvolvimento deste estudo, procedeu-se à supervisão da produção dos blocos de RCD (resíduos da construção e demolição), bem como o ensaio acústico realizado para posterior simulação de barreira acústica.

3.8.1 Características dos Agregados Reciclados de RCD

Os blocos de concreto de RCD (resíduos da construção e demolição), foram desenvolvidos no laboratório de materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, sendo uma cooperação entre os pesquisadores de iniciação científica do curso de Engenharia Civil (DACOC) e Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC).

Para a produção dos blocos, utilizou-se material reciclado na quase totalidade da sua composição, tendo o cimento Portland a única matéria prima natural inserida no processo. Conforme ilustra a Figura 49 foram utilizados para produzir os blocos os seguintes materiais reciclados: pedrisco como agregado graúdo e areia como agregado miúdo.

Figura 49 – Materiais reciclados utilizados na composição dos blocos de concreto. A) Pedrisco como agregado graúdo; B) Areia como agregado miúdo.



Fonte: Sousa (2019).

As Tabelas 8 e 9 apresentam as propriedades dos agregados graúdo e miúdo utilizados na produção dos blocos de concreto de resíduos da construção e demolição (RCD).

Tabela 8 – Propriedades do agregado graúdo: pedrisco.

Propriedades	Valor
Dimensões máximas característica	< 6,3 mm
Sulfatos	< 1%
Teor de fragmentos de cimento e rocha	> 90%
Absorção de água	< 7%
Cloretos	< 1%
Materiais não minerais	< 2%
Torrões de argila	< 2%
Teor de finos passante na malha	0,075 mm < 10%
Teor total máximo de contaminantes	< 3%

Fonte: Sousa (2019).

Tabela 9 – Propriedades do agregado miúdo: areia.

Propriedades	Valor
Dimensões máximas característica	< 4,8 mm
Sulfatos	< 1%
Absorção de água	< 12%
Cloretos	< 1%
Materiais não minerais	< 2%
Torrões de argila	< 2%
Teor de finos passante na malha	0,075 mm < 10%
Teor total máximo de contaminantes	< 3%

Fonte: Sousa (2019).

A produção de blocos de concreto de RCD obedece rigorosamente à norma brasileira NBR 15116:2004 (Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos), referente às especificações técnicas aplicáveis aos blocos de concreto tradicionais existentes no mercado.

3.8.2 Traços Utilizados para a Produção dos Blocos de RCD

Diferentes traços foram obtidos durante a pesquisa, até alcançar o desempenho mecânico esperado dos blocos de concreto. Na Tabela 10 estão expressos os traços avaliados, sendo o traço “K” adotado por apresentar melhor desempenho.

Tabela 10 – Traços realizados para a produção dos blocos.

Tipo	Traço
A	1:5:4:0,55
B	1:3,5:1,5:1,31
C	1:5,38:2,57:0,63
D	1:4:5,5:1,25
E	1:2:3:0,65
F	1:2,5:3,5:0,4
G	1:4:2:0,4
H	1:7:1,58:0,4
I	1:3,48:3,96:0,5
J	1:5:4:1
K	1:3,5:1,5:0,63

Fonte: Sousa (2019).

3.8.3 Ensaio Acústico das Amostras de Concreto de RCD

O ensaio acústico das amostras de concreto de RCD para obtenção do coeficiente de absorção sonora (α) foi realizado no laboratório de acústica do departamento de engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), bem como, no laboratório de acústica do departamento de mecânica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUCPR). O procedimento empregado nesta etapa foi somente para comparar com os resultados obtidos do tubo de impedância desenvolvido no laboratório de acústica UTFPR. Portanto, os valores das medições foram comparados em termos de seus valores NRC (*Noise Reduction Coefficient*).

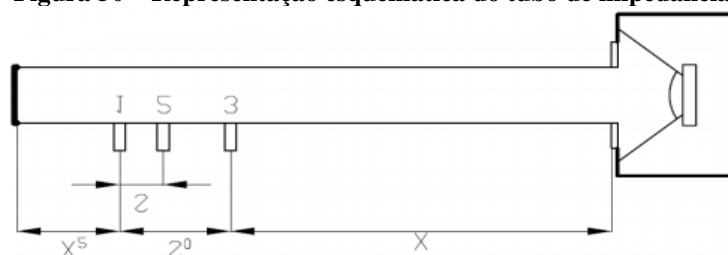
3.8.4 Ensaio Acústico: Laboratório de Acústica da UTFPR

Para realizar a medição do coeficiente de absorção sonora (α), seguiu-se as recomendações da norma ISSO 10534-2 (*Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method*). Neste estudo, o coeficiente de absorção foi medido na faixa de frequência entre 200 Hz e 3150 Hz.

Realizou-se o ensaio acústico em um tubo de impedância, que é utilizado para obter o coeficiente de absorção sonora (α) de uma amostra de material colocada em uma das extremidades do tubo, oposta ao do alto-falante. Esse processo de medição foi realizado no laboratório de acústica do departamento de engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

A representação esquemática e as dimensões do tubo de impedância, utilizado neste estudo, estão apresentadas na Figura 50 e na Tabela 11. O tubo de impedância foi desenvolvido e apresentado no estudo intitulado “*Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência*” (BUSULO, 2017).

Figura 50 – Representação esquemática do tubo de impedância.



Fonte: Busulo (2017).

Tabela 11 – Dimensionamento do tubo de impedância.

Dimensões do tubo de impedância e distância entre os microfones					
Distância a fonte sonora “x”	Distância microfones “S ₀ ”	Distância microfones “S”	Distância amostra “x ₂ ”	Comprimento total	Diâmetro do tubo
200 mm	90 mm	50 mm	250 mm	540 mm	50 mm

Fonte: Busulo (2017).

3.8.5 Equipamentos e Programas Computacionais para o Ensaio Acústico na UTFPR

Para realizar a medição do coeficiente de absorção no tubo de impedância foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Microfone de ½” com pré-amplificador da marca 01dB;
- Conversor AD/DA (placa RME Multiface II);
- Amplificador de potência;
- ITA toolbox (*Matlab*).

Após realizar a medição de coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância, aplicou-se a média aritmética dos valores medidos de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, para encontrar o coeficiente de redução sonora (*Noise Reduction Coefficient*, NRC).

Lembrando que conforme aborda a literatura, o NRC é um número único que sumariza a capacidade de absorção sonora do material em análise (BISTAFA, 2011). Na sequência, pode-se inserir o NRC (coeficiente de redução sonora) na base de dados do *software SoundPlan*, para proceder ao cálculo de nível sonoro e simulação da barreira acústica.

3.8.6 Ensaio Acústico: Laboratório de Acústica da PUCPR

Os tubos de impedância de altas e baixas frequências utilizados no laboratório de acústica da PUCPR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná) estão ilustrados na Figura 51. O tubo de alta frequência possui diâmetro interno de 28 milímetros, e o de baixa frequência possui 100 milímetros de diâmetro interno, os ensaios foram realizados seguindo o método ASTM E1050-10:2012. Este método recomenda que o sinal de teste seja um ruído aleatório com densidade de espectro uniforme ao longo da faixa de frequência de interesse.

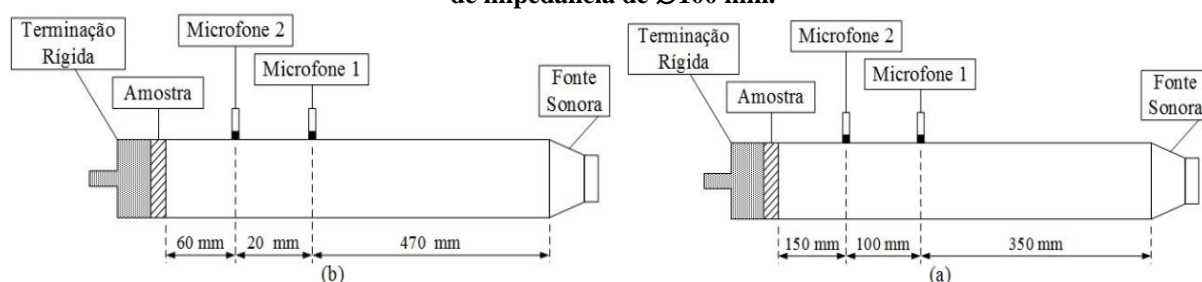
Figura 51 – Tubo de impedância da Universidade PUCPR.



Fonte: Autora (2019).

As representações das distâncias entre os microfones dos tubos estão ilustradas na Figura 52.

Figura 52 – Posição dos microfones nos tubos de impedância. a) Tubo de impedância de $\varnothing 28$ mm. b) Tubo de impedância de $\varnothing 100$ mm.



Fonte: Terashima (2016).

As amostras de RDC (resíduos da construção e demolição) foram extraídas direto dos blocos de concreto, são do mesmo lote de blocos que foram ensaiados no tubo de impedância no laboratório da universidade UTFPR. Para tanto, utilizou-se duas serras copos diamantadas para concreto com diâmetros interno de 28 mm e 100 milímetros.

A Figura 53 apresenta a preparação das amostras de $\varnothing 28$ mm e 17 mm de espessura. Um total de 12 amostras para medição do coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância de alta frequência.

Figura 53 – Preparo das amostras de RCD para ensaio de absorção sonora no laboratório da PUCPR. A) Extração das amostras com serra copo. B) Amostras com Ø28 mm x 17 mm. C) Medição do coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância de alta frequência.



Fonte: Autora (2019).

Na sequência foram preparadas e ensaiadas no tubo de impedância de baixa frequência as amostras com dimensões de Ø100 mm e 17 mm de espessura. Um total de 12 amostras, conforme ilustra a Figura 54.

Figura 54 – Preparo das amostras de RCD para ensaio de absorção sonora no laboratório da PUCPR. A) Extração das amostras com serra copo. B) Amostras com Ø100 mm x 17 mm. C) Medição do coeficiente de absorção sonora no tubo de impedância de baixa frequência.



Fonte: Autora (2019).

Nos ensaios realizados na PUCPR, o valor médio do coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, apresentou $\alpha = 0,320$ na frequência de 1000 Hz. A mesma frequência de 1000

Hz dos ensaios realizados na UTFPR obteve um valor médio de $\alpha = 0,298$. Na frequência de 2000 Hz o valor médio foi de $\alpha = 0,215$, no laboratório de acústica da PUCPR, e no laboratório de acústica da UTFPR foi um coeficiente de $\alpha = 0,212$ para a frequência de 2000 Hz. São valores próximos quando comparados os ensaios acústicos entre um tubo desenvolvido no laboratório com um tubo comercial.

Neste estudo, optou-se por apresentar no capítulo de resultados os valores obtidos no laboratório de acústica do departamento de engenharia mecânica da UTFPR, uma vez que os dados (coeficientes de absorção sonora) obtidos na PUCPR se aproximam, principalmente, nas frequências de 1000 Hz e 2000 Hz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No decorrer do presente capítulo encontram-se descritos os resultados obtidos a partir de coleta de dados realizada em campo, bem como, resultados do mapeamento de ruído e da simulação de barreira acústica, elaborados no *software SoundPlan*[®], versão 7.4. E, ainda, resultados sobre do experimento fatorial e do ensaio acústico realizado para medir o coeficiente de absorção sonora de amostras de blocos de concreto de RCD (resíduo da construção e demolição) e convencionais (bloco tradicional).

Os resultados quantitativos das grandezas sonoras e da análise fatorial estão apresentados e discutidos por meio de Apêndices, Figuras, Gráficos, Quadros e Tabelas. Quanto aos resultados dos cenários simulados estão expostos em forma de mapas acústicos horizontais (*Grid Noise Map*) e mapas verticais (*Cross Section Noise Map*).

Importante ressaltar que, o estudo de mapeamento foi realizado no ano de 2017 e 2018. Neste período a norma ABNT NBR 10151:2000 (Acústica – Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento) estava em vigor. Em 31 de maio de 2019, a ABNT publicou a norma ABNT NBR 10151:2019 (Acústica – Medição e Avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas – Aplicação de uso geral), que revisa a norma ABNT NBR 10151:2000.

4.1 ESTUDO DE CAMPO 1: MAPEAMENTO SONORO EM UM CÂMPUS UNIVERSITÁRIO

Os dados obtidos na área universitária estão apresentados separadamente por pontos e por dias, totalizando 22 (vinte e dois) pontos de medições em três dias. Realizou-se o mapeamento sonoro no período diurno, entre às 08h e 11h30 da manhã. Os dados coletados tiveram como intuito a validação do modelo computacional, a fim de o mesmo apresentar resultados o mais próximo possível da realidade. Todos os dados levantados estão tabulados e disponíveis em Apêndices no final da tese.

Para facilitar a leitura dos níveis sonoros em cada ponto de medição, adotou-se a referência dos pontos receptores como $P = \{P1, \dots, P22\}$. A seguir, para uma análise dos dados coletados *in loco* estão apresentados na seguinte ordem: (1) grandezas acústicas (L_{Aeq} , L_{max} , L_{min} , L_{10} e L_{90}) e (2) contagem volumétrica de veículos, os quais foram registrados simultaneamente.

4.1.1 Grandeza Acústica L_{Aeq} : Câmpus Universitário

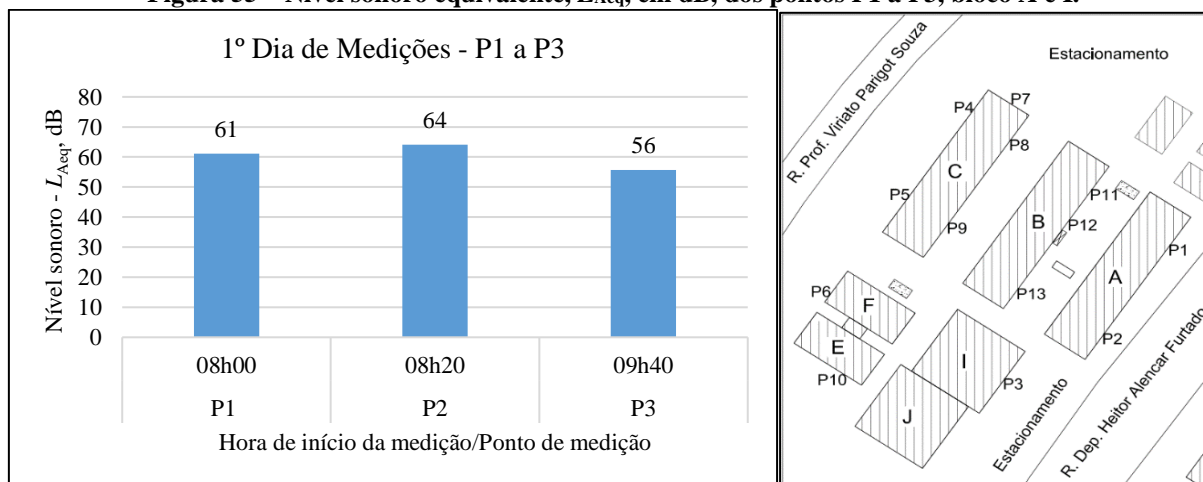
A Figura 55 ilustra os níveis de pressão sonora equivalentes – L_{Aeq} , dB, referentes ao primeiro dia de medições. Os registros foram realizados dia 20/04/2017, entre 08h e 09h, em pontos distintos próximos ao bloco A e bloco I. Quanto aos dados climáticos as seguintes variáveis foram registradas durante o período de medição: manhã parcialmente nublada, brisa leve (1m/s), temperatura entre 21°C e 19°C, umidade relativa do ar entre 68% e 65% e pressão atmosférica entre 913 hPa e 911 hPa (Apêndice A).

No primeiro dia de medição foram registrados somente os três primeiros pontos, devido a mudanças meteorológicas em relação ao início da medição, em particular destaque à velocidade e direção do vento.

Os valores de níveis sonoros equivalentes no primeiro dia da série de medições foram 61 dB, 64 dB, 56 dB, respectivamente. Os pontos P1, P2 e P3 estão próximos à Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, sendo esta, com fluxo de veículos leves e pesados, a mesma via possui uma canaleta para passagem de transporte público coletivo, podendo ser considerada uma das principais fontes de poluição sonora devido ao ruído gerado pelo tráfego veicular.

Nota-se um nível de ruído elevado no P2, isto ocorre pelo fato de ter uma parada de ônibus (transporte público coletivo) mais próxima ao ponto receptor. No ponto P3, o nível de pressão sonora registrou uma tendência de diminuição, observa-se por meio da Figura 55 (lado direito - representação gráfica da área em estudo), que a distância entre o eixo da via de tráfego (Rua Deputado Heitor Alencar Furtado) e o ponto receptor (P3) está mais distante em relação ao P1 e P2, e, também há um estacionamento próximo ao P3, o qual durante a medição havia carros estacionados.

Figura 55 – Nível sonoro equivalente, L_{Aeq} , em dB, dos pontos P1 a P3, bloco A e I.

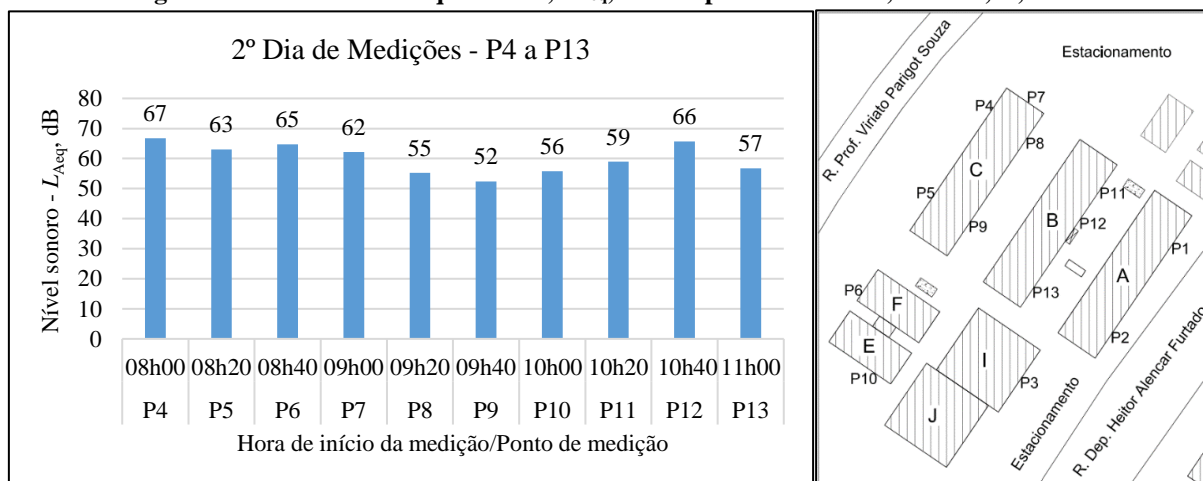


Fonte: Autora (2018).

A Figura 56 apresenta a variação de nível de pressão sonora equivalente - L_{Aeq} , dB, entre os pontos P4 e P13. Esta série foi realizada no segundo dia de medições, dia 25/04/2017, tendo início às 08h e término às 11h15 da manhã. O clima apresentava sol entre nuvens, velocidade do vento 2m/s, temperatura entre 16°C e 18°C, umidade relativa do ar registrada no início em 84% e término 80% e a pressão atmosférica entre 910 hPa e 912 hPa.

Observa-se que a variação dos níveis sonoros equivalentes ficou entre 52 dB e 67 dB. Por meio da representação gráfica (Figura 56) que mostra a distribuição dos blocos chamou a atenção de o nível sonoro ser elevado no ponto P12, 66 dB, entre os blocos A e B, comparados aos pontos P4, P5 e P6, os quais estão próximos à via rápida de elevado fluxo de veículos (Rua Professor Pedro Viriato Parigot Souza). Este comportamento é justificado porque o P12 está próximo ao refeitório e o mesmo possui um exaustor na lateral externa da edificação que estava em funcionamento durante o período de medições.

Figura 56 – Nível sonoro equivalente, L_{Aeq} , dB dos pontos P4 a P13, bloco B, C, E e F.



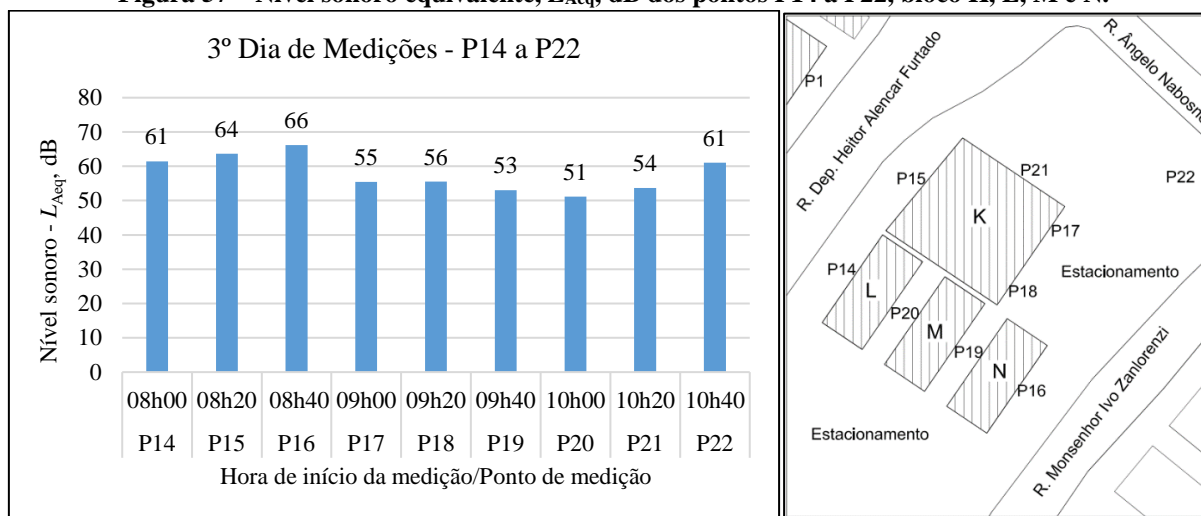
Fonte: Autora (2018).

Na Figura 57 está exposto a variação de nível de pressão sonora equivalente - L_{Aeq} , dB, referente às medições realizadas no terceiro dia, na data 03/05/2017, entre os pontos P14 e P22, com início às 08h e término às 11h. Estes pontos de medições estão referenciados nos blocos K, L, M e N, o quais estão separados pela Rua Deputado Heitor Alencar Furtado dos demais blocos já analisados. Os pontos receptores P14 e P15 estão paralelos aos pontos P1, P2 e P3, conforme pode ser visto na representação gráfica. Nota-se que os pontos P14 e P15 apresentaram os mesmos níveis de pressão sonora que o P1 e P2, valores de 61 dB e 64 dB, respectivamente.

O ponto receptor P16 que se encontra próximo à via rápida (Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi) registrou o nível sonoro mais elevado, de 66 dB, leva-se em consideração a este ponto devido à via de tráfego ter uma velocidade média de 60 km/h. Já a Rua Deputado Heitor

Alencar Furtado, tem uma velocidade média de 40 km/hora, onde se encontra próximos aos pontos P14 e P15.

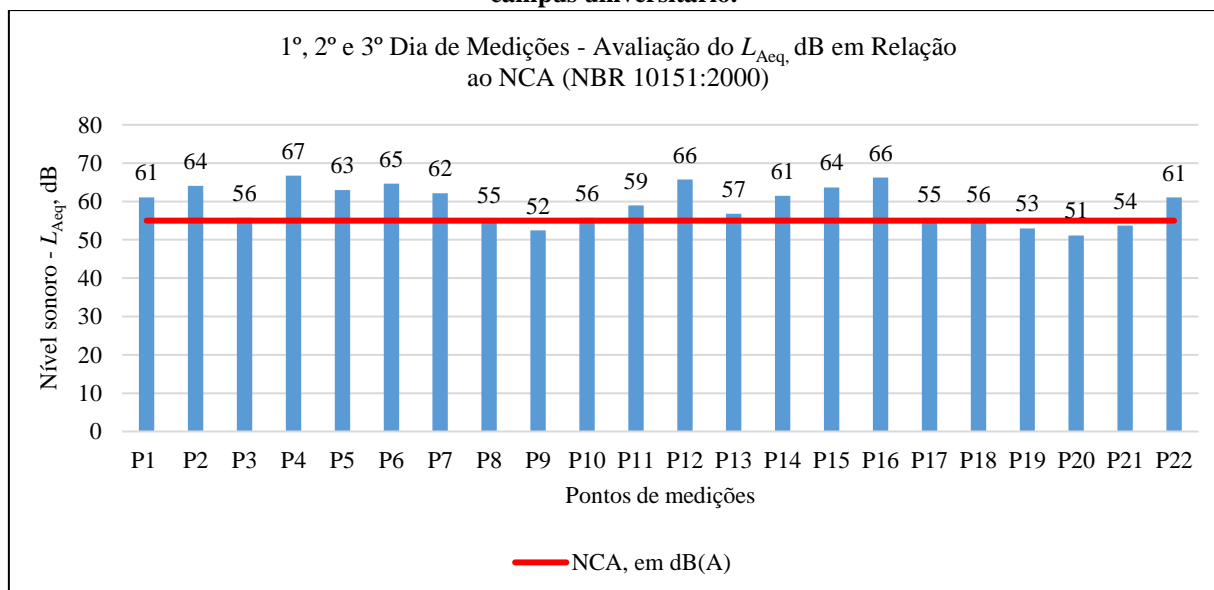
Figura 57 – Nível sonoro equivalente, L_{Aeq} , dB dos pontos P14 a P22, bloco K, L, M e N.



Fonte: Autora (2018).

Observa-se na Figura 58, uma variação geral do nível de pressão sonora equivalente - L_{Aeq} , dB, registrada durante o período de pesquisa *in loco*, no câmpus da UTFPR. Chama-se a atenção que 72,72% dos pontos analisados estão acima do limite do nível sonoro permitido pela norma, para ambientes externos, principalmente os pontos que estão localizados próximos às vias de tráfego veicular (vias de 30km/h e 60km/h). Apenas 18,18% dos pontos receptores estão abaixo do limite e 9,09% estão no limite máximo estabelecido. Para a área em estudo a norma NBR 10151:2000, estabelece para o NCA (nível de critério de ação) nível de 55 dB, período diurno.

Figura 58 – Análise dos níveis de pressão sonora equivalente, L_{Aeq} , (dB) dos 22 pontos avaliados no câmpus universitário.



Fonte: Autora (2018).

4.1.2 Grandezas acústica L_{Amax} e L_{Amin} : Câmpus Universitário

O Quadro 7 e a Figura 59 ilustram os registros sonoros de L_{Amax} e L_{Amin} em função do tempo, em cada ponto de medição da área em estudo, câmpus universitário, realizou-se também uma comparação com os níveis L_{Aeq} , já apresentados anteriormente.

Quadro 7 – Registros sonoros referentes aos níveis L_{Amax} e L_{Amin} comparados aos níveis L_{Aeq} .

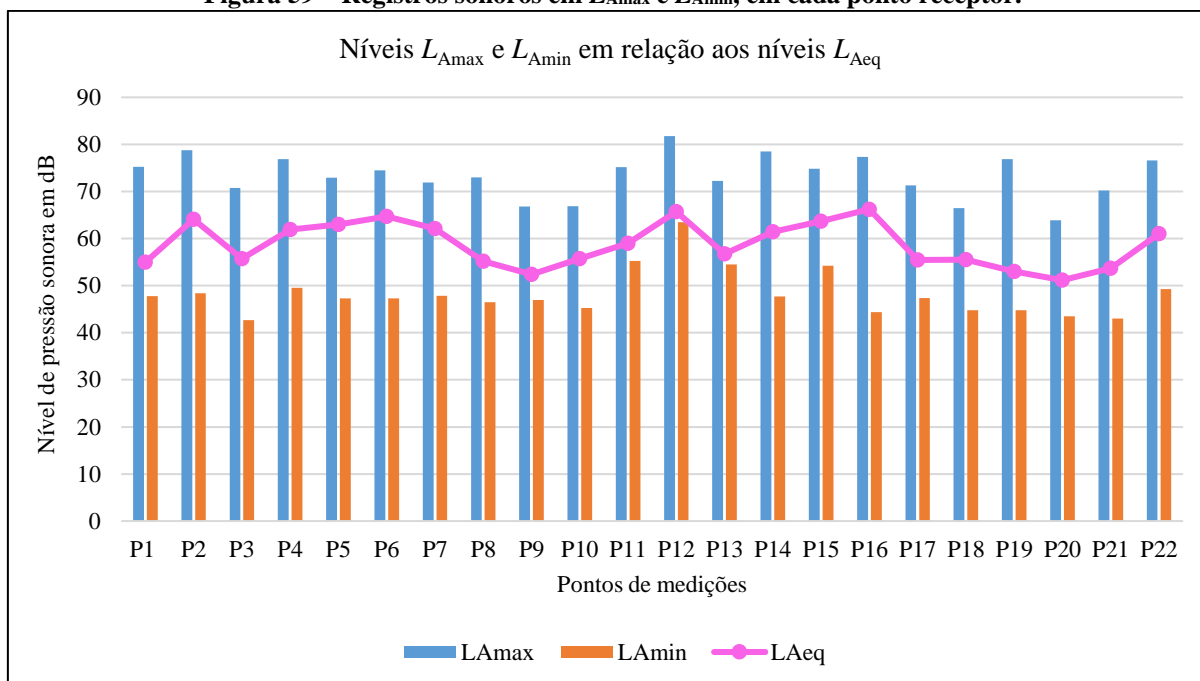
L_{Amax} e L_{Amin} registrados durante intervalo de tempo (T) de 15 minutos, comparação em relação L_{Aeq}			
Ponto	L_{Amax} dB	L_{Amin} dB	L_{Aeq} dB
P1	75	48	61
P2	79	48	64
P3	71	43	56
P4	77	50	67
P5	73	47	63
P6	74	47	65
P7	72	48	62
P8	73	47	55
P9	67	47	52
P10	67	45	56
P11	75	55	59
P12	82	63	66
P13	72	55	57
P14	78	48	61
P15	75	54	64
P16	77	44	66
P17	71	47	55
P18	66	45	56
P19	77	45	53
P20	64	43	51
P21	70	43	54
P22	77	49	61

Fonte: Autora (2018).

O nível sonoro máximo (L_{Amax}) apresentou uma variação entre de 64 dB e 82 dB, sendo o nível mais elevado registrado no P12, bloco B, próximo ao restaurante universitário, onde se encontra instalado um exaustor. Com relação aos pontos próximos às vias de tráfego (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P14, P15 e P16), os níveis sonoros máximos ultrapassaram os 70 dB, tendo o P2 com registro de 79 dB, este ponto está situado no bloco A, paralelo a parada de ônibus urbano. Em comparação aos níveis equivalentes, a grandeza L_{Aeq} , apresentou uma variação de níveis sonoros entre 51 dB e 67 dB, com níveis sonoros mais elevados próximos às vias principais de tráfego, bem como, próximo ao bloco B, onde está instalado o refeitório.

Nota-se que os níveis sonoros mínimos (L_{Amin}) próximos às vias de tráfego de veículos não ultrapassam o nível de critério de avaliação (NCA) da norma NBR 10151:2000, o qual é estabelecido em 55 dB para a área em avaliação. Somente o ponto P12, próximo ao exaustor no bloco B que atingiu o nível sonoro mínimo de 63 dB (Figura 59).

Figura 59 – Registros sonoros em L_{Amax} e L_{Amin} , em cada ponto receptor.



Fonte: Autora (2018).

4.1.3 Grandezas Sonoras L_{10} e L_{90} (Níveis Estatísticos)

Para indicar o limite superior do ruído flutuante ao longo das medições, utilizou-se os descritores estatísticos L_{10} e L_{90} . Vale ressaltar que os níveis L_{10} e L_{90} calculam a porcentagem do tempo que um nível sonoro excedeu durante o período de medição.

Estes níveis foram avaliados nesta pesquisa pautado no exemplo dado pela Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos (*Federal Highway Administration – FHWA*). Este órgão adota o nível L_{10} como grandeza acústica para avaliar o ruído em áreas destinadas a residências. Consideram o nível critério $L_{10} = 60$ dB em áreas onde há necessidade de tranquilidade e $L_{10} = 70$ dB para áreas residenciais, escolas e similares.

Observa-se que o nível L_{A10} está afastado do L_{A90} , o que pode ser considerado maior incômodo do ruído, devido à variação de nível sonoro durante o período de medição. O nível L_{A10} registrou um pico de 70 dB, isto é, o nível de pressão sonora de 70 dB excedeu 10% durante o intervalo de tempo de medição no ponto P16. Tal ponto está localizado próximo à Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi, a qual possui um elevado fluxo de veículos por hora. Conforme ilustra o Quadro 8 e a Figura 60, exceto nos pontos P9 e P20, o L_{10} ou o L_{90} , excedeu o nível indicado na norma americana, FHWA.

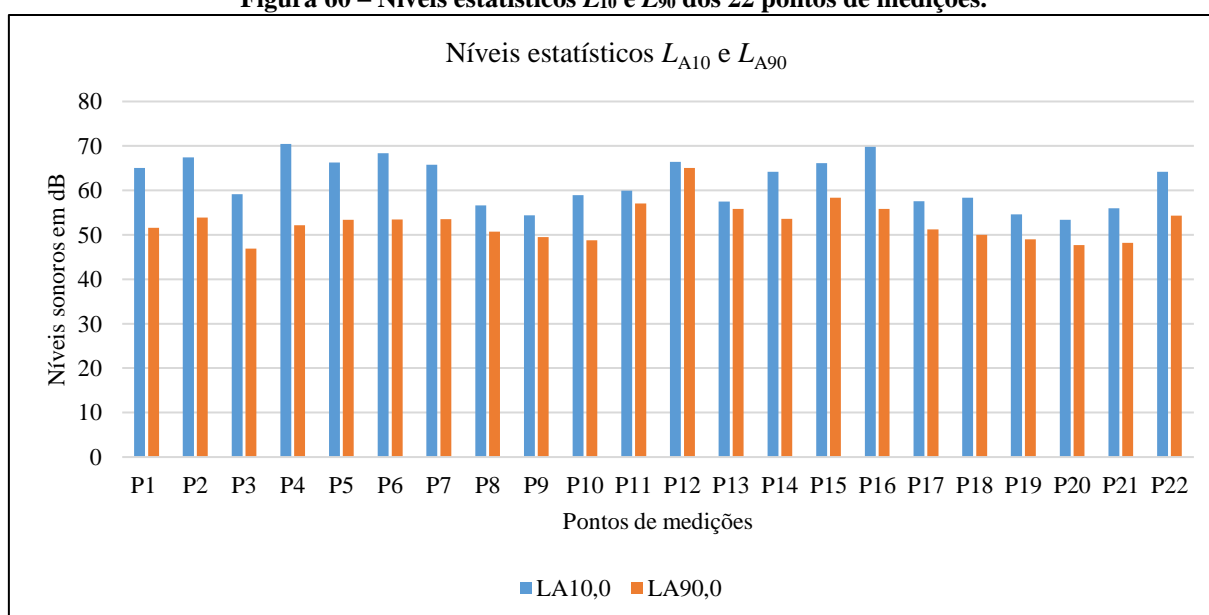
Quadro 8 – Níveis sonoros L_{A10} e L_{A90} que ocorreram durante um intervalo de medição em cada ponto receptor no câmpus universitário.

Níveis sonoros estatísticos L_{A10} e L_{A90} (dB)		
Ponto	L_{A10}	L_{A90}
P1	65	52
P2	67	54
P3	59	47
P4	70	52
P5	66	53
P6	68	53
P7	66	54
P8	57	51
P9	54	50
P10	59	49
P11	60	57
P12	66	65
P13	58	56
P14	64	54
P15	66	58
P16	70	56
P17	58	51
P18	58	50
P19	55	49
P20	53	48
P21	56	48
P22	64	54

Fonte: Autora (2018).

Por meio da Figura 60, observa-se a distribuição dos níveis estatísticos dos 22 pontos receptores medidos no câmpus universitário.

Figura 60 – Níveis estatísticos L_{10} e L_{90} dos 22 pontos de medições.



Fonte: Autora (2018).

4.1.4 Caracterização de Tráfego Veicular Próximo ao Câmpus Universitário

A contagem volumétrica de tráfego veicular, de forma manual, permitiu a caracterização dos veículos conforme estabelece a norma alemã RLS:1990, veículos leves e veículos pesados. O Quadro 9 contém o número de veículos registrados a cada quinze minutos de contagem, a qual ocorreu simultaneamente com as medições de níveis sonoros.

De modo geral, os valores obtidos em cada ponto de contagem, mostram a variação entre as categorias, leves e pesados. Os pontos receptores P1, P2, P14 e P15, apresentaram maior número de veículos pesados, pois estes pontos estão paralelos à Rua Deputado Heitor Alencar Furtado, onde há uma via exclusiva para o fluxo de transporte público coletivo urbano.

Quadro 9 – Contagem volumétrica de tráfego de veículos próximo ao câmpus universitário.

Contagem de veículos durante as medições de nível sonoro <i>in loco</i>					
Ponto receptor	Tempo (15 min.)	Leves	Pesados	Total	Quantidade de dias
P1	08h00	81	34	115	1º dia de medição
P2	08h20	85	29	114	
P3	09h40	82	24	106	
P4	08h00	625	6	631	2º dia de medição
P5	08h20	475	9	484	
P6	08h40	309	3	312	
P7	09h00	136	3	139	
P8	09h20	0	0	0	
P9	09h40	0	0	0	
P10	10h00	16	1	17	
P11	10h20	0	0	0	
P12	10h40	0	0	0	
P13	11h00	0	0	0	
P14	08h00	111	31	142	3º dia de medição
P15	08h20	73	31	104	
P16	08h40	241	5	246	
P17	09h00	182	4	186	
P18	09h20	209	8	217	
P19	09h40	14	1	15	
P20	10h00	11	2	13	
P21	10h20	48	3	51	
P22	10h40	60	2	62	

Fonte: Autora (2018).

Após finalizar a tabulação de dados coletados *in loco*, elaborou-se o mapa de ruído da área em estudo, câmpus universitário.

4.2 MAPA DE RUÍDO DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO

Elaborou-se o mapa de ruído da área em questão em duas etapas. A primeira etapa compreendeu a modelagem para a validação do modelo computacional, a fim de obter os

resultados dos níveis sonoros iguais ou próximos aos dados registrados *in loco*, e a segunda etapa, considerou a simulação da barreira acústica para comparações dos níveis sonoros com barreira e sem barreira em torno do câmpus.

Vale ressaltar que o cálculo do nível sonoro pode ser aceite caso a diferença entre os valores calculados (retirados dos mapas de ruído elaborados) e os valores medidos *in loco* não ultrapasse ± 2 dB (AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE, 2011).

4.2.1 Modelagem Computacional Tridimensional do Câmpus Universitário

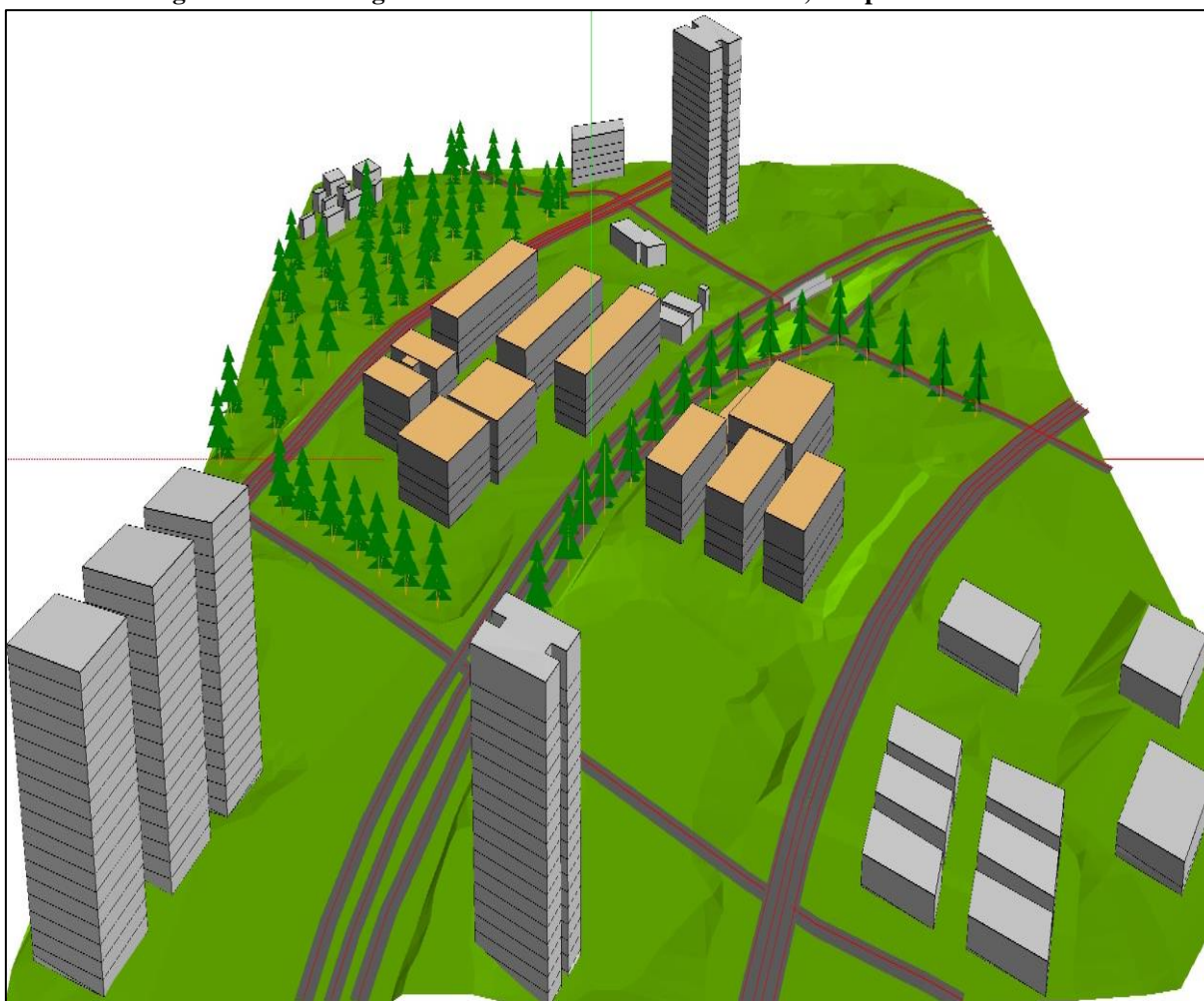
A simulação computacional da área em estudo ocorreu após o mapeamento de ruído ter sido realizado *in loco* (levantamento quantitativo do nível sonoro). O conhecimento na prática, da área em questão, foi importante para poder elaborar a modelagem no *software*. A definição da topografia do terreno, das vias/veículos (fontes sonoras), dos pontos receptores, das edificações, das fontes fixas e da área de cálculo, foram os dados iniciais necessários para configurar os parâmetros de entrada para a elaboração da primeira etapa de simulação, com o intuito de elaborar o mapa acústico do câmpus universitário.

A modelagem da área, objeto de estudo, foi elaborada de acordo com a realidade que se encontrava no mês de abril e maio de 2017, respeitando todas as características da área (elevação do terreno, edificações, contagem volumétrica de veículos por categoria, tipo das vias de fluxo veicular). Quanto a arborização, esta não foi considerada, pois as árvores não se encontravam de forma densa, estando espalhadas, o que, pode-se considerar que não há atenuação sonora de forma significativa.

A Figura 61 ilustra o cenário da região em estudo, e observa-se que pode ser considerada como uma de área livre, poucas edificações, sem instalações de barreiras artificiais ou naturais, por conseguinte, nesta situação, ocorre a propagação de ruído típica em situações de campo livre, havendo uma redução sonora com a distância, à medida que o ruído diverge da fonte.

Nota-se que não têm semáforos em todas as vias em torno da universidade, apenas no cruzamento da via rápida, Rua Professor Pedro Viriato Parigot Souza com a Rua Ângelo Nabosne semáforos. Também, observa-se que não há redutores de velocidade, como radares ou elevações nas vias (lombadas).

Figura 61 – Modelagem tridimensional da área em estudo, câmpus universitário.



Fonte: Autora (2018).

As fontes de ruído contempladas neste estudo, como mencionado anteriormente, são as vias de tráfegos, principais fontes de emissão de ruído externo da área em estudo. O programa computacional foi alimentado com todas as informações relativas ao tráfego de veículos.

Os mapas acústicos foram elaborados para o indicador L_d (nível dia), em uma altura de avaliação de 1,5 metro (um metro e meio) em relação ao nível do solo, conforme as exigências mínimas de altura padronizada pela Comunidade Europeia (DIRECTIVA 2002/49/EC; WG-AEN - *European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise*, 2007).

4.2.2 Mapa de Ruído no Plano Horizontal: Validação do Modelo Computacional do Câmpus

A calibração do mapa acústico é uma importante etapa que permite a validação do mapa de ruído. Neste processo, não só as características do terreno, edificações e vias são relevantes, mas também os pontos exatos de medições realizadas *in loco* devem ser implementados no modelo computacional da região. Assim, a partir dos receptores pontuais verifica se os níveis

sonoros calculados estão semelhantes ou ao menos próximos aos níveis sonoros registrados em campo.

A validação do modelo acústico pode propiciar tanto os valores simulados dos níveis sonoros, compatíveis com a situação real, quanto a representatividade da inserção da barreira acústica com o intuito de calcular a atenuação sonora.

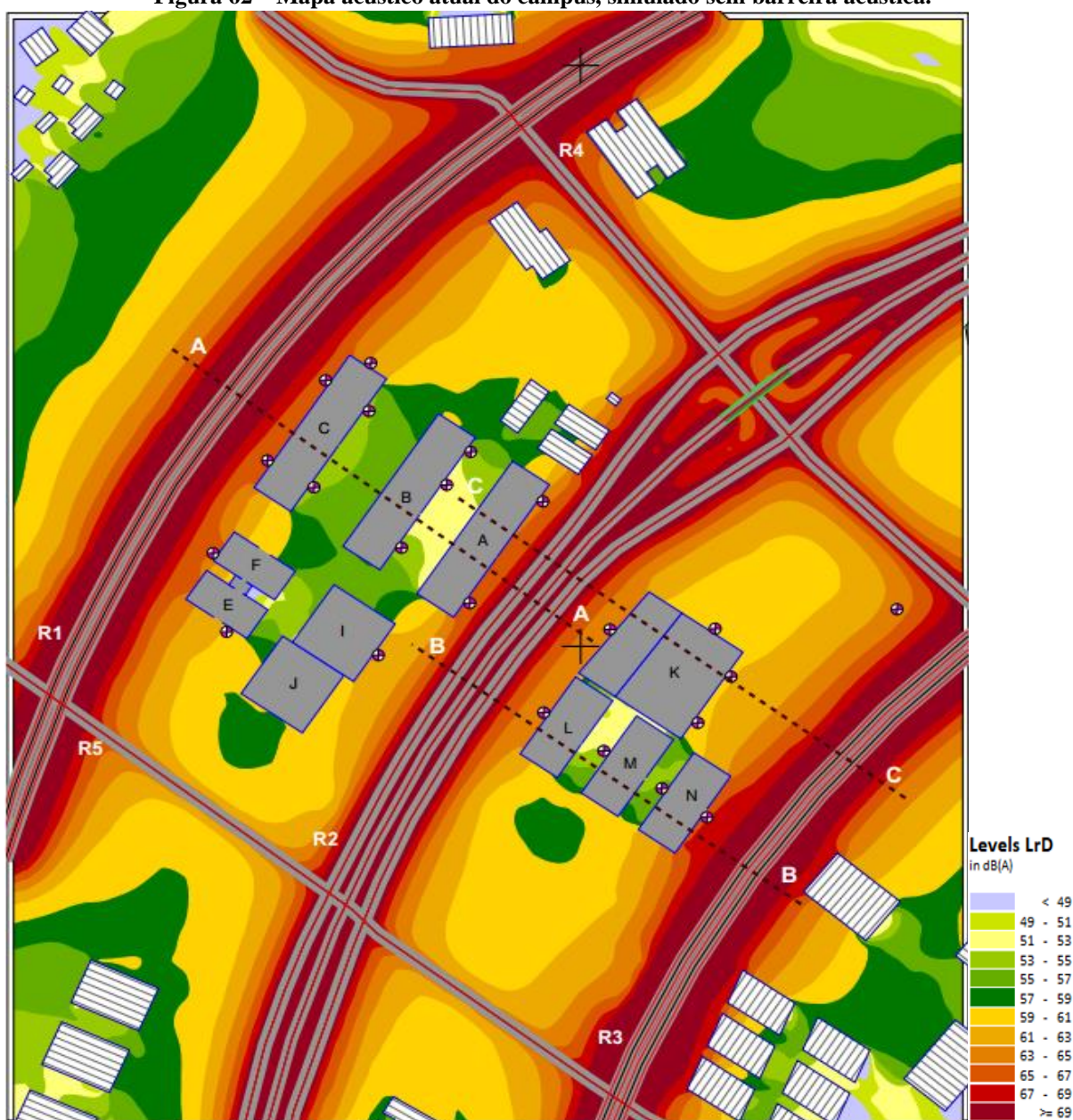
A seguir, apresenta-se a Figura 62, para uma análise preliminar do mapa de ruído, no plano horizontal (*Grid Noise Map*), mostrando o cenário acústico atual do câmpus universitário. Para uma análise com mais detalhes tem-se o Apêndice B, o qual possui uma legenda do lado direito do mapa com as simbologias dos principais objetos presentes no local (traçado das vias, edificações, ponte, receptores, semáforo), também mostra uma escala com diversas cores que estão associadas às variações dos níveis sonoros entre 40 dB a 70 dB, o indicador do nível sonoro está apresentado em intervalo de 2 dB.

Observa-se no mapa, por meio da representação gráfica do ruído, que há propagação sonora gerada pelo tráfego de veículos das principais vias. Neste mapa, optou-se por nomear as vias por R1, R2, R3, R4 e R5, para manter uma melhor qualidade da imagem.

As edificações para fins acadêmicos próximas às vias R1, R2 e R3 (R1 – Rua Professor Pedro Viriato Parigot Souza; R2 – Rua Deputado Heitor Alencar Furtado e R3 – Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi), estão expostas a um nível sonoro mais elevado em relação aos blocos acadêmicos mais afastados. Pois os blocos frente às vias dificultam a livre propagação sonora, comportando-se como barreiras acústicas, em outras palavras, os blocos atenuam os níveis sonoros porque estão interpostos entre a fonte (via de tráfego veicular) e o receptor.

Assim, analisando os aspectos visuais do mapa, escala gráfica, pode-se identificar uma quantidade de cores mais escuras em relação às cores mais claras. Isto comprova a análise realizada anteriormente, com os dados quantitativos levantados *in loco*, que os níveis sonoros se encontram relativamente elevados quando comparados às legislações existentes. Também, por meio de aspectos visuais da área em estudo, ficou evidente que o problema de ruído ou a propagação sonora ao ar livre envolve uma fonte sonora (tráfego de veículos), a trajetória de transmissão (ar, estruturas sólidas/paredes) e o receptor (pessoas).

Figura 62 – Mapa acústico atual do câmpus, simulado sem barreira acústica.



Fonte: Autora (2018).

As vias, R4 e R5 (R4 – Rua Ângelo Nabosne e R5 – Rua Rogério Pereira Camargo), por sua vez, apresentam cores mais claras por não possuir um tráfego veicular intenso. Mesmo que estas vias gerem ruídos consideráveis não causam impactos sonoros significativos nos blocos acadêmicos, quando comparados às vias principais. Estas vias não só apresentam tráfego menos intenso, como também estão mais distantes dos receptores.

Embora as vias R4 e R5 apresentem níveis sonoros menos elevados, e que não atinjam de forma intensa a universidade, deve-se considerar o incômodo que causa às pessoas que ali habitam, enfatizando que os limites sonoros estabelecidos por normas, as quais são mencionadas neste estudo, são menores do que os registrados na região.

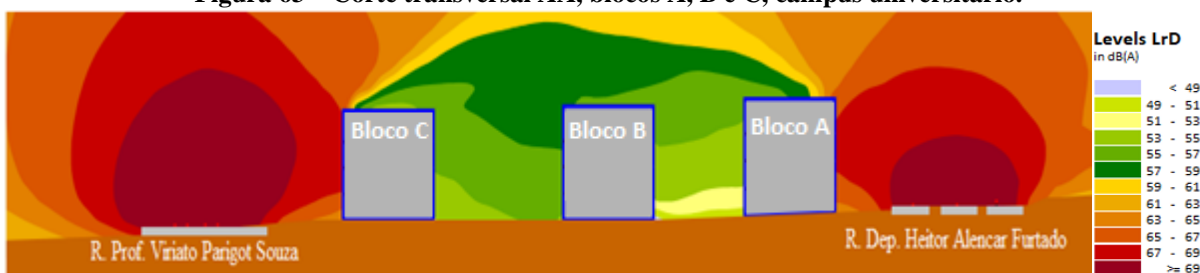
A análise do mapa de ruído, permite observar que são poucos os pontos receptores que apresentam os níveis sonoros relativamente com menor intensidade. Como já mencionado, isso pode ocorrer devido à presença de espaços livres em torno do câmpus universitário e devido à falta da inserção de barreira acústica, estrutura essencial para atenuação sonora ao ar livre, pois a barreira impede a visão da fonte sonora pelo receptor.

Ainda sobre a análise da primeira etapa da simulação do mapa de ruído estão apresentados a seguir o campo acústico no plano vertical da área em questão, assim, permitindo uma melhor observação e análise da propagação do ruído produzido pelas principais vias próximas ao câmpus.

4.2.3 Mapa de Ruído Vertical (*Grid Noise Cross Section Map*) do Câmpus Universitário

Ao analisar o comportamento da propagação das ondas sonoras nas fachadas das edificações, nota-se um decaimento dos níveis sonoros em relação ao eixo das vias, isso ocorre em virtude da distância que há entre as vias e os blocos acadêmicos. Observa-se por meio da Figura 63, que os níveis sonoros resultantes nas fachadas são diferentes em relação à altura dos edifícios, isto é, os níveis sonoros mais intensos ocorrem, não no primeiro andar, mas a partir do segundo andar acima do nível das vias.

Figura 63 – Corte transversal AA, blocos A, B e C, câmpus universitário.



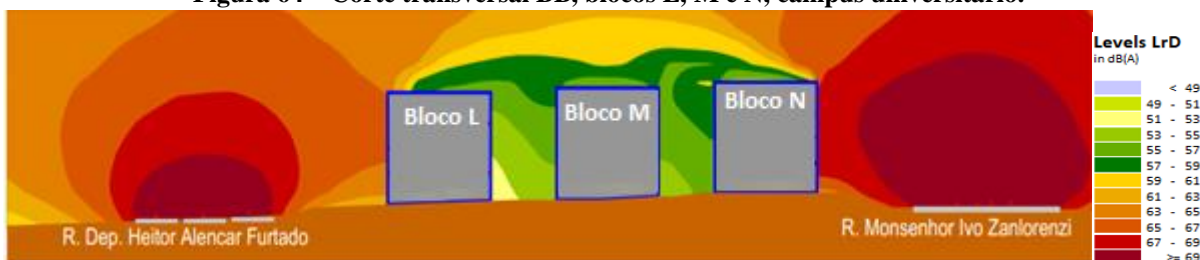
Fonte: Autora (2018).

Ao analisar as Figuras 63, 64 e 65 constata-se que os blocos acadêmicos intercalados estão mais protegidos dos elevados níveis sonoros, pois, ocorre a formação de zona de sombra acústica (área onde produz atenuação acústica) com valores de níveis sonoros abaixo de 55 dB, o qual é o valor máximo aceitável para esta área em estudo, segundo a norma técnica NBR 10151:2000, bem como a Lei Municipal Ordinária de Curitiba nº. 10625:2002.

A redução do nível sonoro além de ser ocasionada pela trajetória percorrida pela onda sonora (receptores afastados em relação ao eixo da via), indica também que as edificações atenuam o ruído quando se interpõem entre a fonte sonora e o receptor. Neste caso, o ruído que

atinge o receptor é o som difratado no topo dos edifícios, bem como, somando-se aos que são penetrados e se propagam através das aberturas laterais entre os blocos.

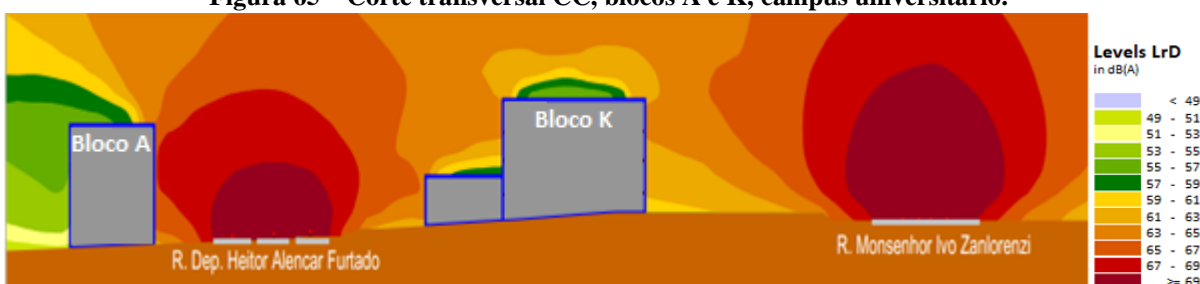
Figura 64 – Corte transversal BB, blocos L, M e N, câmpus universitário.



Fonte: Autora (2018).

A Figura 65 mostra os edifícios acadêmicos que estão às margens da via de tráfego (Rua Deputado Heitor Alencar Furtado). Nota-se que não existe obstáculo entre a fonte sonora (via) e os receptores (blocos), ao contrário dos blocos intercalados, estes blocos são atingidos por um nível sonoro mais elevado nas fachadas. Neste caso, as edificações que margeiam a via de tráfego veicular podem amplificar o ruído devido às reflexões nas fachadas dos edifícios.

Figura 65 – Corte transversal CC, blocos A e K, câmpus universitário.



Fonte: Autora (2018).

As observações realizadas após a primeira etapa de simulação do mapa de ruído sem barreira acústica permitem afirmar que pode haver atenuação dos níveis sonoros com a inserção de barreira acústica entre a fonte sonora e o receptor. Ficou evidente que por detrás de cada edificação são formadas as zonas de sombra acústica com valores reduzidos dos níveis sonoros.

4.3 COMPARAÇÃO ENTRE NÍVEIS SONOROS MEDIDOS E SIMULADOS DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO

Seguindo todos os procedimentos metodológicos para elaboração da modelagem do terreno, do cálculo do nível sonoro, da calibração do modelo e da produção do mapa de ruído (*Grid Noise Map/Cross Section Noise Map*), foi possível, por meio de dados quantitativos, realizar a comparação dos níveis sonoros medidos em campo com os níveis sonoros calculados.

A Tabela 12 e a Figura 66, trazem a comparação entre valores de níveis sonoros medidos e simulados, demonstrando que o modelo se encontra calibrado. Como já mencionado, a

diferença quando os valores medidos e calculados no *software* são comparados não deve ultrapassar ± 2 dB. Consta-se, entretanto, uma divergência de valores de níveis sonoros em quatro pontos medidos e calculados. Os pontos receptores P11, P12, P13 e P15, registraram ruídos elevados durante as medições realizadas *in loco*, apresentando diferenças entre medido e simulado de 8,3 dB, 17,3 dB, 5,5 dB e 2,4 dB.

Os pontos receptores P11, P12 e P13 (bloco B) estão próximos ao refeitório, o qual tem a instalação de um exaustor da cozinha com elevado nível de ruído. O ponto P15 (bloco K), está próximo a um laboratório onde são realizados ensaios mecânicos.

Tabela 12 – Comparação dos níveis sonoros medidos *in loco* versus simulados.

Comparação entre os níveis sonoros equivalentes medidos e calculados – câmpus universitário			
Ponto de medição	Medições <i>in loco</i> L_{Aeq} , dB	Simulação computacional L_{Aeq} , dB	Diferença medição versus simulação
P1	61,1	61,5	-0,4
P2	64,1	63,7	0,4
P3	55,7	55,8	-0,1
P4	66,7	64,5	2,2
P5	63,0	62,8	0,2
P6	64,7	63,3	1,4
P7	62,2	60,9	1,3
P8	55,2	53,3	1,9
P9	52,4	52,6	-0,2
P10	55,7	55,8	-0,1
P11	59,0	50,7	8,3
P12	65,7	48,4	17,3
P13	56,8	51,3	5,5
P14	61,5	61,1	0,4
P15	63,7	61,3	2,4
P16	66,2	64,5	1,7
P17	55,5	55,6	-0,1
P18	55,5	55,8	-0,3
P19	53,0	53,1	-0,1
P20	51,2	50,6	0,6
P21	53,7	54,1	-0,4
P22	61,0	60,9	0,1

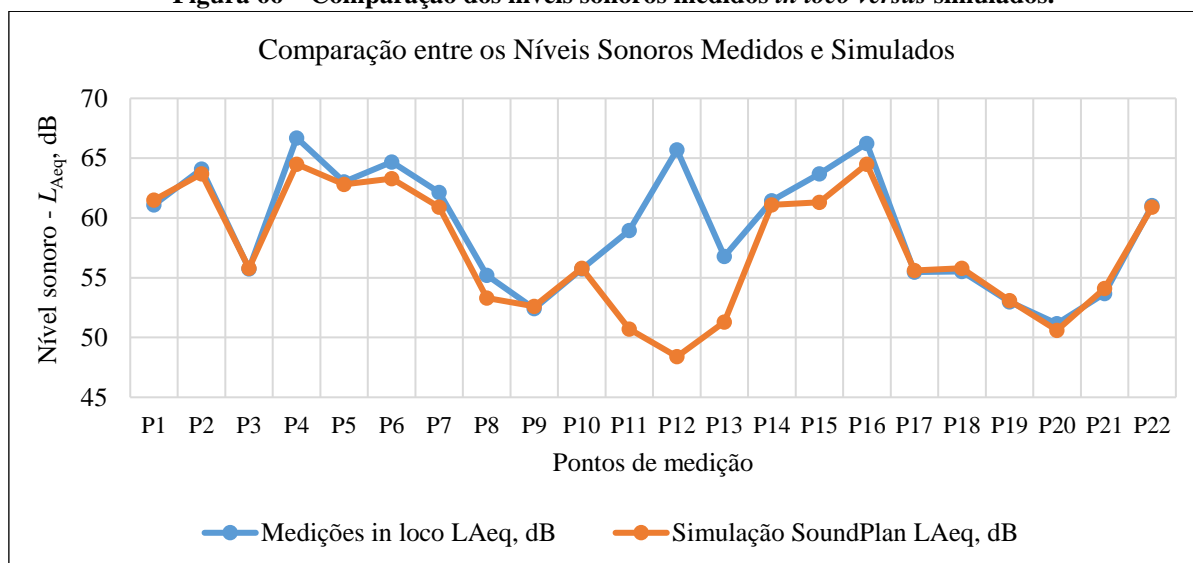
Fonte: Autora (2018).

A Figura 66 mostra por meio de gráfico a comparação entre os valores medidos em campo e simulados no *software SoundPlan*.

Vale ressaltar que, todas as fontes sonoras fixas existentes na área acadêmica foram caracterizadas *in loco*, como por exemplo, estações de energia, exaustores, compressores, estacionamentos e restaurante universitário. Porém, as fontes fixas não estão indicadas no modelo computacional, apenas foram citadas para justificar a diferença entre os valores dos níveis sonoros medidos e simulados, isso ocorreu por não obter o módulo específico que

permite inserir fontes sonoras fixas no modelo de cálculo computacional. Isso explica o porquê que os pontos P11, P12 e P13 não estão calibrados conforme os demais pontos receptores.

Figura 66 – Comparação dos níveis sonoros medidos *in loco* versus simulados.



Fonte: Autora (2018).

De acordo com o mapeamento de níveis sonoros, tanto realizado *in loco* como por meio de simulação em torno do câmpus universitário, pode-se observar que a maior área receptora de ruído proveniente do tráfego de veículos, está localizada nas proximidades das principais vias, conhecidas como Rua Professor Pedro Viriato Parigot Souza, Rua Deputado Heitor Alencar Furtado e Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi.

Este estudo mostrou até o momento como o som é produzido, propagado e quais os valores de níveis sonoros que atingem as edificações em avaliação. Percebe-se que a partir do conhecimento desses três componentes básicos, a decisão de propor modificação que atenua o ruído é uma tarefa relativamente simples, isto é, a inserção de barreira acústica entre a fonte e o receptor, como forma de amenizar o impacto sonoro que atinge a área acadêmica.

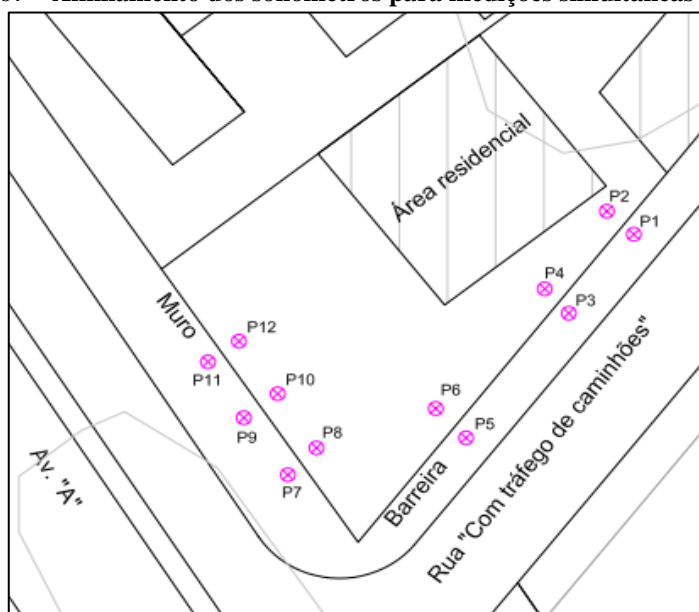
4.4 ESTUDO DE CAMPO 2: AVALIAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA AO AR LIVRE – ÁREA RESIDENCIAL

As medições de nível de pressão sonora foram realizadas dia 12/04/2018, no período diurno, entre 07h e 10h, período considerado com alto volume de tráfego. A duração do tempo de cada medição de ruído e a contagem volumétrica do fluxo de veículos foram agrupadas em períodos de 15 (quinze) minutos, simultaneamente. A média de fluxo de veículos leves foi de aproximadamente 3.086 veículos por hora e de transporte pesado aproximadamente 68 veículos por hora, dados registrados durante a série de medições próximo à barreira acústica.

Quanto aos dados climáticos as seguintes variáveis foram registradas durante o período de medição, sem apresentar variações: manhã de céu limpo, brisa leve (1m/s), temperatura de 16°C, umidade relativa do ar 85% e pressão atmosférica 914 hPa.

A Figura 67 relembra os pontos marcados para fazer a avaliação de atenuação, assim facilita a leitura dos níveis sonoros expostos nos Quadros a seguir (13, 14 e 15). Realizou-se as medições do ruído, de dois em dois pontos simultaneamente, por exemplo, o P1 está localizado próximo à face da barreira exposta à fonte sonora (via de tráfego) e o P2 está localizado próximo à face da barreira voltada ao receptor (lado oposto da via).

Figura 67 – Alinhamento dos sonômetros para medições simultâneas do ruído.



Fonte: Autora (2018).

O Quadro 10 apresenta os valores de níveis sonoros equivalentes referente ao ruído incidente na barreira acústica na área de interesse. Para facilitar a leitura dos níveis sonoros em cada ponto de medição, adotou-se a referência dos pontos receptores como $P = \{P1, \dots, P12\}$.

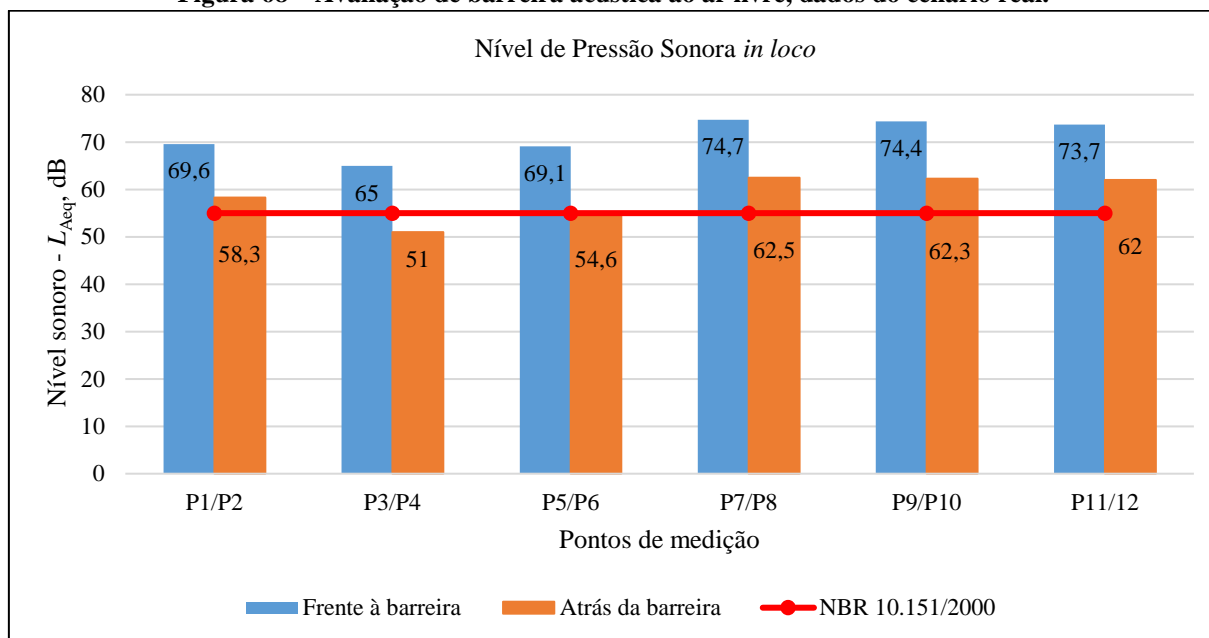
Quadro 10 – Avaliação de barreira acústica ao ar livre, dados do cenário real.

Avaliação de atenuação sonora da barreira acústica em situação real								
Avaliação sonora de nível equivalente – [L_{Aeq} , dB]							Contagem de veículos	
Ponto receptor	Face da barreira exposta à fonte sonora (via de tráfego)	Ponto receptor	Face da barreira voltada ao receptor (lado oposto da via)	Atenuação <i>in loco</i>	Data	Hora de início	Leves	Pesados
P1	69,6	P2	58,3	11,3	12/04/18	07h40	861	24
P3	65,0	P4	51,0	14,0		08h00	756	14
P5	69,1	P6	54,6	14,5		08h20	700	15
P7	74,7	P8	62,5	12,2		08h55	769	16
P9	74,4	P10	62,3	12,1		09h00	565	12
P11	73,7	P12	62,0	11,7		09h20	572	13

Fonte: Autora (2018).

Para melhor visualização, a Figura 68 apresenta os valores dos níveis sonoros equivalentes referentes ao ruído incidente na barreira acústica, assim como o nível medido atrás da barreira. Lembrando que para a área em estudo, a norma brasileira NBR 10151:2000 estabelece um limite máximo de 55 dB, para o período diurno.

Figura 68 – Avaliação de barreira acústica ao ar livre, dados do cenário real.



Fonte: Autora (2018).

4.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE BARREIRA ACÚSTICA AVALIADA *IN LOCO*

No *software AutoCAD 2016*[®] (versão *student*), elaborou-se a geometria do terreno com as devidas altimetrias e os demais elementos como edificações, principais vias de tráfego, pontos receptores demarcados *in loco* e a inserção da barreira acústica em escala real.

Na sequência, o arquivo foi importado pelo *software SoundPlan*[®], versão 7.4, para proceder ao cálculo de nível de pressão sonora e simulação da barreira acústica. Nesta etapa todas as variáveis coletadas *in loco* (média do fluxo de veículos por hora, temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica) foram parâmetros de entrada para a validação do mapa acústico, assim possibilitando gerar os valores de níveis sonoros compatíveis com a situação real.

Na modelagem computacional os pontos receptores pontuais foram caracterizados conforme a avaliação realizada *in loco*, estão inseridos próximo à face da barreira voltada à geração de ruído e próximos à face da barreira oposta à geração de ruído, afastados aproximadamente 1,2 do piso. Definiu-se uma área de cálculo, a qual é necessária para o

programa gerar o mapa acústico no plano horizontal, após esse primeiro processo de cálculo de nível de pressão sonora, procedeu-se à simulação computacional com a inserção da barreira acústica, conforme pode-se observar de forma gráfica a propagação sonora da área de estudo por meio da Figura 69 e do APÊNDICE C.

O mapa acústico do cenário atual, possibilita uma primeira análise da poluição sonora produzida devido ao fluxo intenso de veículos. De forma visual, tem-se uma noção geral do impacto sonoro que atinge a barreira acústica da área residencial, mostrando que a região em questão está exposta a níveis sonoros acima do que é recomendado pela norma técnica NBR 10151:2000, o qual seria de 55 dB para o período diurno, pois esta área tem característica de área mista, predominantemente residencial.

A barreira acústica de três metros de altura construída entre a área residencial e o Hipermercado apresentou melhor desempenho referente a atenuação sonora quando comparada ao muro de alvenaria. Por meio da escala gráfica, nota-se que os pontos receptores próximo a barreira acústica, face oposta ao ruído, apresentou níveis sonoros de acordo com a norma NBR 10151:2000. Já os demais pontos receptores próximos ao muro, face oposta ao ruído, continuam com níveis acima do estabelecido pela norma. Porém, deve-se levar em consideração que o muro faz fronteira com a barreira, e, encontra-se paralelo a avenida com fluxo de tráfego intenso e com uma altura de 2,8 metros.

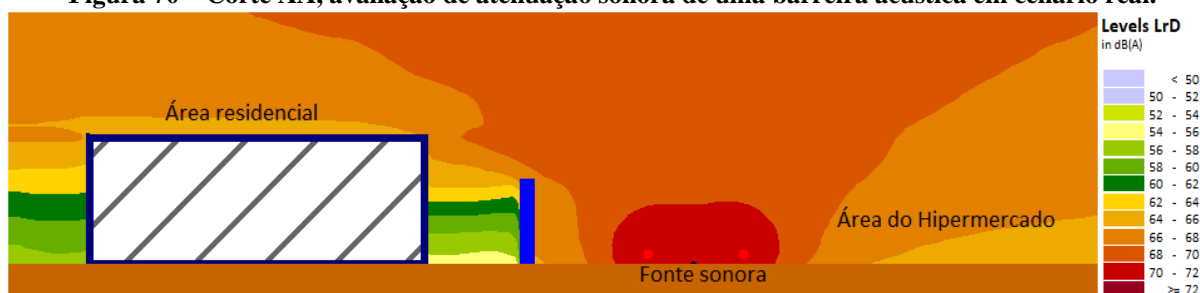
Figura 69 – Mapa de ruído com a inserção da barreira acústica conforme situação real.



Fonte: Autora (2018).

A Figura 70, ilustra o mapa acústico no plano vertical passando pelos pontos receptores P3/P4, mostrando o comportamento da barreira em relação à trajetória do ruído. Observou-se que para o cálculo realizado no modelo computacional é indiferente a forma que constitui a barreira, levando em consideração somente as dimensões da barreira e as distâncias que envolvem a fonte, o receptor e a barreira.

Figura 70 – Corte AA, avaliação de atenuação sonora de uma barreira acústica em cenário real.



Fonte: Autora (2018).

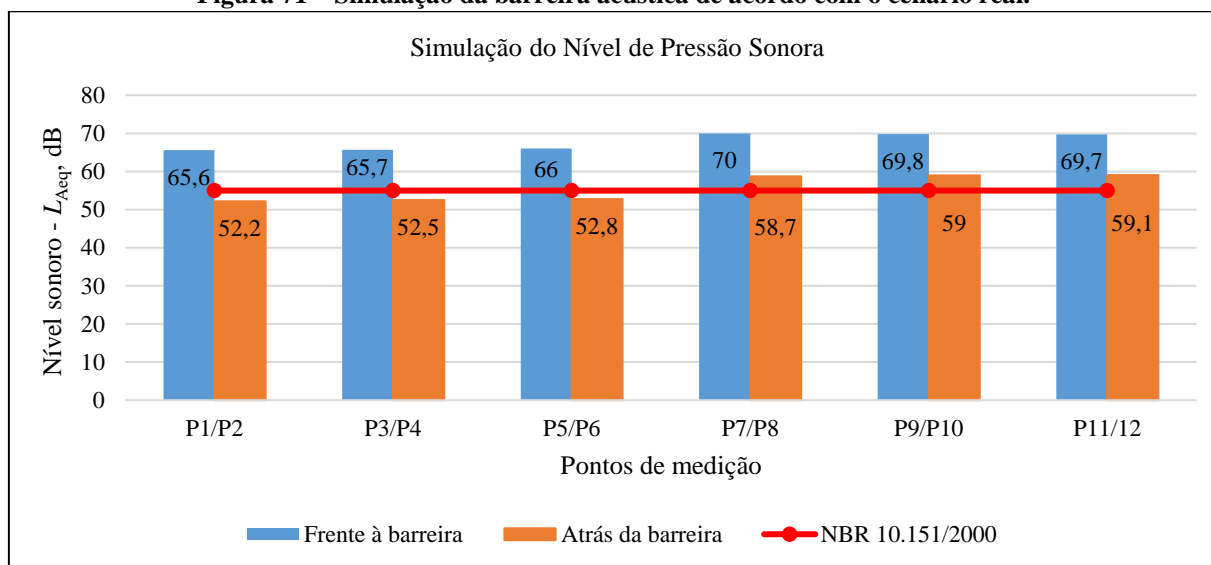
A partir da simulação do mapa acústico, obteve-se para cada receptor, o nível sonoro contínuo equivalente total, conforme ilustrado no Quadro 11 e na Figura 71. Esses valores foram comparados aos níveis aferidos em campo, com o intuito de validar a aplicabilidade do modelo computacional, tanto para o cálculo de nível de pressão sonora quanto ao desempenho de atenuação da barreira acústica.

Quadro 11 – Simulação da barreira acústica de acordo com o cenário real.

Simulação da barreira do cenário atual da área residencial – [L_{Aeq} , (dB)]				
Ponto receptor	Face da barreira exposta à fonte sonora (via de tráfego)	Ponto receptor	Face da barreira voltada ao receptor (lado oposto da via)	Atenuação por simulação
P1	65,6	P2	52,2	13,4
P3	65,7	P4	52,5	13,2
P5	66,0	P6	52,8	13,2
P7	70,0	P8	58,7	11,3
P9	69,8	P10	59,0	10,7
P11	69,7	P12	59,1	10,6

Fonte: Autora (2018).

Figura 71 – Simulação da barreira acústica de acordo com o cenário real.



4.6 COMPARAÇÃO ENTRE NÍVEIS SONOROS MEDIDOS E CALCULADOS

A comparação de nível de pressão sonora medido em relação ao modelo computacional está exposta no Quadro 12 e na Figura 72. Nota-se uma diferença significativa entre os valores medidos em relação ao modelo computacional. Isto pode ser explicado pelo fato do incômodo constante no cotidiano de áreas urbanas que estão expostas ao ruído provocado por aeronaves em sobrevoo, como ocorre neste caso da área residencial, que está aproximadamente a 9 km (nove quilômetros) do aeroporto.

Percebe-se que os únicos pontos receptores que não apresentaram diferença significativa, entre o nível sonoro medido e simulado, foram os pontos P3/P4. Vale destacar que somente nestes pontos não sobrevoou nenhuma aeronave durante o período de medição de ruído, nos demais pontos, como por exemplo, nos pontos P1/P2 foram registradas cinco aeronaves durante o período de medição, e nos outros pontos registrou-se em média três aeronaves durante as medições.

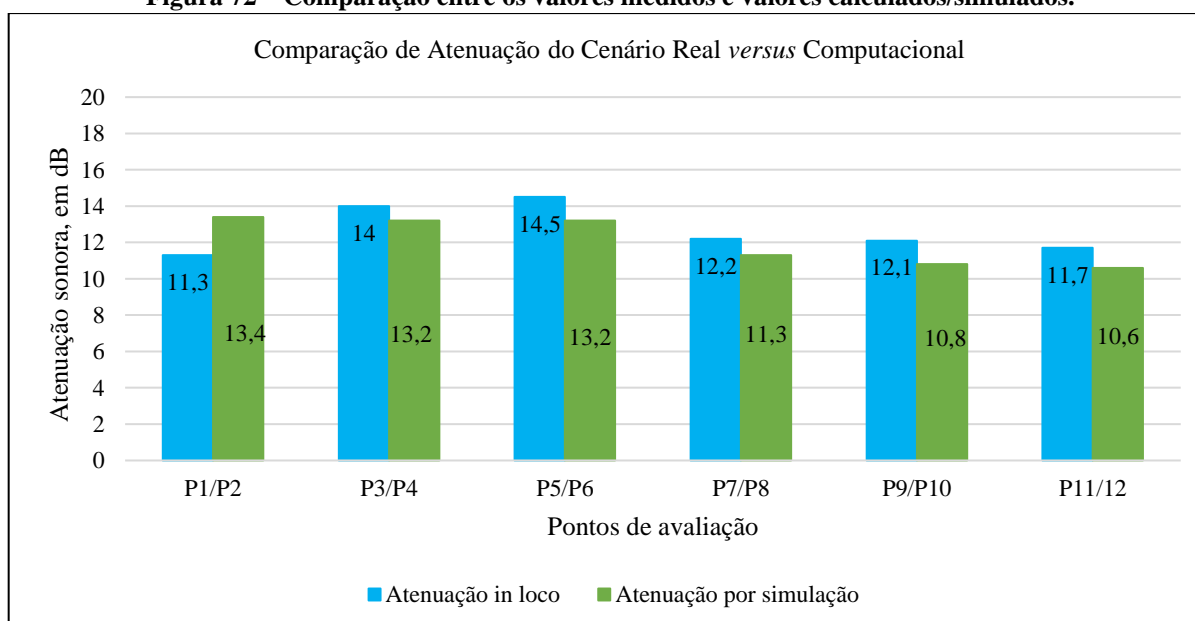
Quadro 12 – Comparação entre os valores medidos em campo e valores calculados/simulados.

Nível sonoro <i>in loco</i> – [L_{Aeq} , dB]			Nível sonoro simulado – [L_{Aeq} , dB]		
Ponto de medição: Face exposta à fonte sonora (via de tráfego)	Ponto de medição: Face voltada ao receptor (lado oposto da via)	Atenuação <i>in loco</i>	Ponto de medição: Face exposta à fonte sonora (via de tráfego)	Ponto de medição: Face voltada ao receptor (lado oposto da via)	Atenuação por simulação
P1: 69,6	P2: 58,3	11,3	P1: 65,6	P2: 52,2	13,4
P3: 65,0	P4: 51,0	14,0	P3: 65,7	P4: 52,5	13,2
P5: 69,1	P6: 54,6	14,5	P5: 66,0	P6: 52,8	13,2
P7: 74,7	P8: 62,5	12,2	P7: 70,0	P8: 58,7	11,3
P9: 74,4	P10: 62,3	12,1	P9: 69,8	P10: 59,0	10,8
P11: 73,7	P12: 62,0	11,7	P11: 69,7	P12: 59,1	10,6

Fonte: Autora (2018).

Observa-se o resultado da simulação de atenuação da barreira acústica, da situação real, apresentado na Figura 72. Apesar do desvio apresentado entre os dados simulados e medidos referente ao ruído de tráfego de veículos, a otimização da barreira apresentou resultados satisfatórios, quando comparada ao cenário acústico real.

Figura 72 – Comparação entre os valores medidos e valores calculados/simulados.



Fonte: Autora (2018).

Verificou-se a partir deste estudo que a predição da atenuação sonora conferida por barreiras acústicas no modelo computacional, leva-se em conta os fenômenos que interferem

na propagação do ruído como a absorção atmosférica, a temperatura, a velocidade do vento, a distância à fonte, a topografia do terreno, de modo a obter melhor aproximação à realidade.

Constatou-se também, que o modelo computacional pressupõe que a transmissão sonora, quando o ruído atinge a barreira, ocorre por difração no topo da barreira, tanto para a barreira acústica com sistema absorvedor quanto para o muro de alvenaria. Assim, considera que o ruído quando chega à zona de sombra tem seu nível reduzido por difração, sendo neste caso, totalmente desprezível a transmissão sonora através da barreira.

Portanto, com relação à altura, quanto mais alta a barreira maior a zona de sombra acústica e melhor resultado de redução dos níveis de ruído, em contrapartida, aumento de custo, falta de atratividade visual e dificuldade na manutenção, fatores observados e relatados *in loco* durante a realização das medições de ruído na área residencial.

Em geral, no que diz respeito a mapeamento de ruído, este capítulo menciona boas práticas para avaliação sonora ambiental, por exemplo: estimar o nível de pressão sonora, uma vez que, não tínhamos o conhecimento prévio sobre o comportamento de emissão sonora; conhecer e aplicar os procedimentos técnicos definidos pela norma técnica NBR 10151:2000 e Lei Municipal 10625:2002; e, ainda, as medições na prática podem ser usadas para confirmar e validar projetos de mapas de ruído desenvolvidos pela modelagem computacional.

Com relação à modelagem acústica, mostrou-se ser uma ferramenta útil, pois possibilita: diagnóstico da poluição sonora, haja vista que, a sua principal função é demonstrar as áreas problemáticas; auxiliar na definição de planos de ação para minimizar o excesso de ruído; e gerenciamento, controle e monitoramento do ruído ambiental em áreas específicas, como escolas, creches, hospitais, áreas residenciais, entre outras.

Observou-se a relevância em fazer as medições *in loco* para que se possa realizar a validação do mapa acústico, pois, após a elaboração gráfica o mapa indica tendência mais do que os valores reais do ruído, visto que, pode sempre haver fenômenos que influenciam os níveis sonoros que não são simulados ou, até mesmo, levados em consideração no método de cálculo adotado. Entretanto, considera-se válido verificar os resultados do mapeamento de ruído (valores medidos e calculados) de acordo com alguns valores do cenário real.

Assim sendo, a contribuição deste capítulo expressa às boas práticas adotadas para mapeamento de ruído e simulações de barreiras acústicas em áreas ao ar livre. Além da norma e legislação brasileira, os dados aqui apresentados também foram com base em documentos europeus intitulados “*Directrizes para Elaboração de Mapas de Ruído*” e “*Directiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente*”.

4.7 SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA DO CÂMPUS UNIVERSITÁRIO

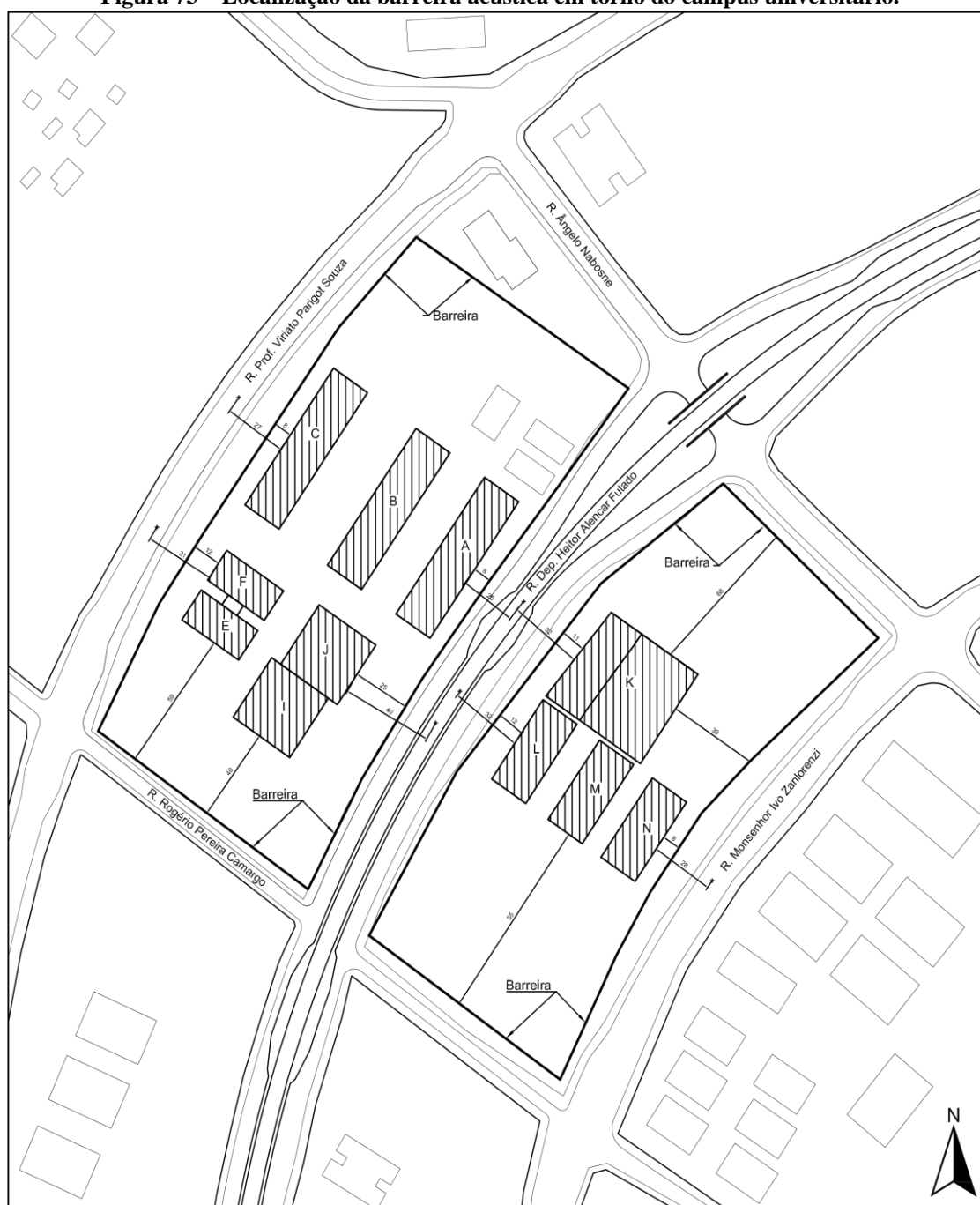
Nesta seção, apresenta-se a quarta etapa da pesquisa que compreende a simulação computacional da barreira acústica proposta. Para tanto, manteve-se a modelagem tridimensional e o mapeamento acústico realizado na primeira etapa deste estudo, acrescentando, apenas, a inserção da barreira acústica para verificar a eficiência de atenuação de ruído em cada um dos pontos receptores. Assim, os valores dos níveis sonoros puderam ser comparados a partir da simulação sem barreira e após a inserção da barreira acústica.

A localização para a implementação da barreira acústica a ser simulada seguiu o mesmo traçado da cerca metálica atualmente existente em torno do câmpus. Nota-se que as cotas estão referenciadas entre a fonte (eixo da via) e a barreira, assim como, barreira e o meio de cada edificação próxima às vias de tráfego. A altura da barreira tem como referência o nível do solo, levando em consideração o desnível observado na topografia do terreno, o qual está apresentado pelas curvas de nível no capítulo 3 (metodologia).

As medidas apresentadas na Figura 73, estão em metros. Observa-se que próximo ao bloco A, a representação da barreira acústica está a 17 metros do eixo da pista (Rua Deputado Heitor Alencar Furtado) e a 8 metros da edificação. Do lado oposto da mesma via, a representação da barreira em relação ao eixo da pista está a 20 metros de distância, e a 12 metros da edificação (bloco L). A representação da barreira acústica próximo à Rua Professor Pedro Viriato Parigot Souza, encontra-se a 19 metros do eixo da via e a 8 metros entre barreira e edificação (bloco C). O eixo da Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi, encontra-se a 20 metros da representação da barreira e a 8 metros entre o bloco N e a barreira. Estas são as distâncias próximas às principais vias de tráfego.

Para avaliar a eficiência da barreira quanto à sua atenuação, a altura mínima de 2 metros e máxima de 3 metros foram estabelecidas para a simulação computacional.

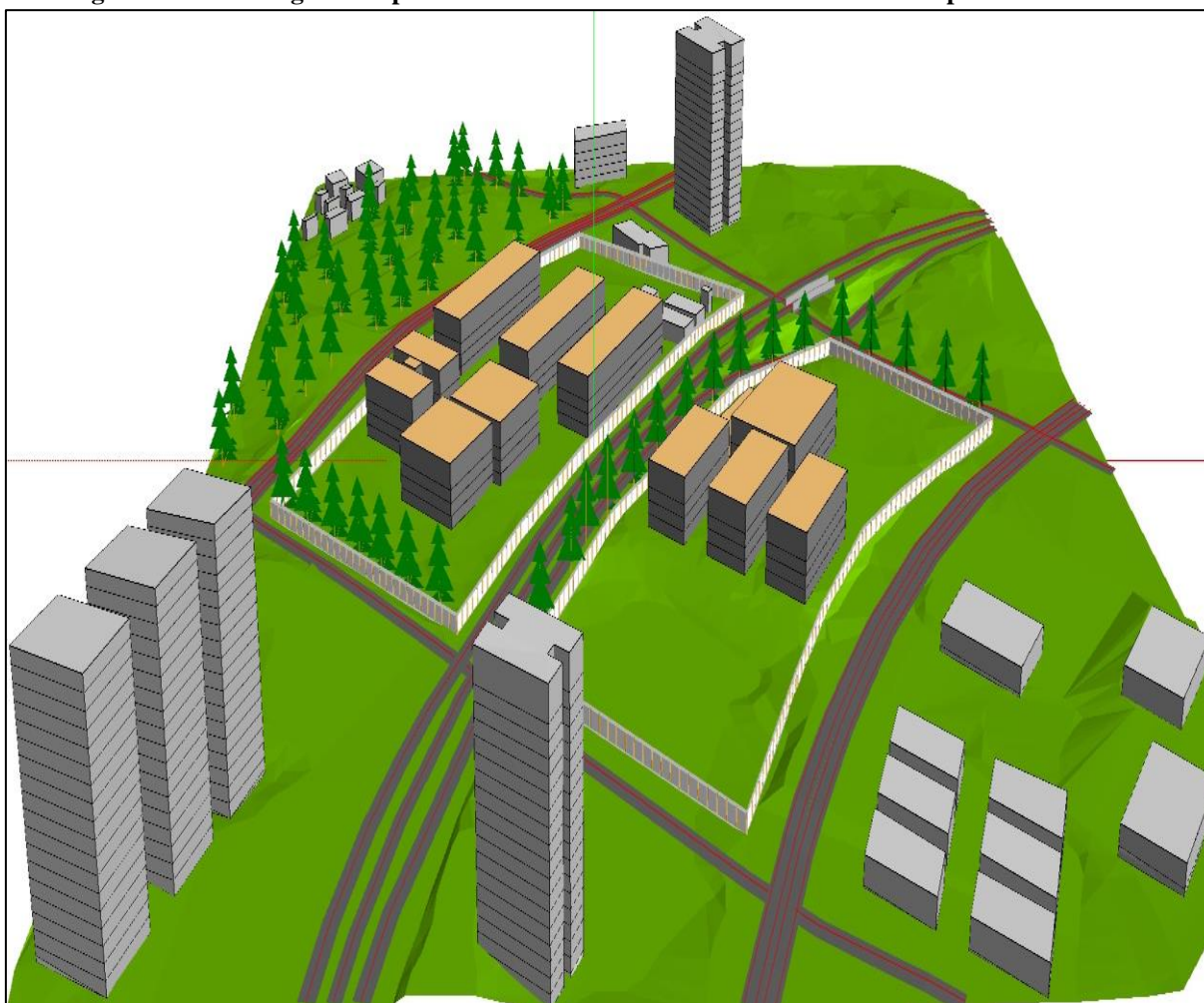
Figura 73 – Localização da barreira acústica em torno do câmpus universitário.



Fonte: Autora (2018).

A Figura 74 ilustra a área em estudo com a modelagem tridimensional da barreira acústica elaborada no *software*. A geometria da barreira foi dividida em seções de 5 (cinco) metros, são comprimentos constantes dos segmentos, para realizar a otimização da barreira no módulo *Wall design*.

Figura 74 – Modelagem computacional da barreira acústica em torno do câmpus universitário.



Fonte: Autora (2018).

O programa de simulação possui uma biblioteca com diferentes tipos de materiais (concreto, bloco de concreto, tijolo, chapa metálica, painel de vidro, madeira oca, madeira maciça, chapa acrílica, mármore, entre outros) que podem ser aplicados para o cálculo de atenuação de barreira acústica, os quais podem ser caracterizados pelos seguintes parâmetros: coeficiente de absorção, coeficiente de reflexão e perda de reflexão em dB.

Neste estudo, a primeira simulação caracterizou a barreira acústica pelo coeficiente de absorção do bloco de concreto, material disponível na biblioteca do programa (Norma alemã RLS:1990). Tal material apresenta um coeficiente de redução sonora (*Noise Reduction Coeficiente* – NRC) de $\alpha = 0,206$. Lembrando que conforme aborda a literatura, o NRC é um número único que sumariza a capacidade de absorção sonora do material em análise (BISTAFA, 2011).

Após a modelagem e escolha do tipo de material, procede-se ao cálculo de atenuação da barreira, considerando somente as superfícies, lado direito e esquerdo da barreira infinita, a grandeza acústica definida foi o L_{Aeq} , dB, conforme, também, adotado *in loco*. De modo geral,

foram considerados nas simulações todos os pontos receptores, mas para uma melhor análise da eficiência da barreira, especificou-se os receptores críticos, os quais estão posicionados de forma paralelo às vias com maior fluxo de veículos. Os receptores considerados críticos são os pontos P1, P2, P3 (blocos A e I), P4, P5, P6 (blocos C e F), P14, P15 (bloco L e K) e P16 (bloco N).

A Tabela 13 apresenta as distâncias perpendiculares entre os eixos das vias de tráfego (fonte) e os receptores, com suas respectivas alturas, bem como, as distâncias dos receptores até a barreira acústica proposta. Nota-se que todas as distâncias entre fonte (eixo das vias) e receptores e entre receptores e barreira são diferentes, apenas a altura do receptor e da fonte em relação ao solo são medidas fixas. Lembrando que na prática e na simulação os pontos receptores estão afastados aproximadamente 2 metros das edificações.

Tabela 13 – Distâncias perpendiculares entre receptor/via e receptor/barreira acústica simulada.

Distâncias perpendiculares dos receptores críticos até a fonte/barreira					
Distâncias em metros					
Ponto	Receptor até o eixo da via (Fonte)	Receptor até a barreira	Altura da fonte sonora em relação à via	Altura do receptor em relação ao solo	Referência dos pontos
P1	25	7	0,5	1,2	Bloco A
P2	21	5	0,5	1,2	Bloco A
P3	38	22	0,5	1,2	Bloco I
P4	25	6	0,5	1,2	Bloco C
P5	26	6	0,5	1,2	Bloco C
P6	29	9	0,5	1,2	Bloco E
P14	30	10	0,5	1,2	Bloco L
P15	29	10	0,5	1,2	Bloco K
P16	26	6	0,5	1,2	Bloco N

Fonte: Autora (2018).

4.8 MAPA RUÍDO COM A INSERÇÃO DA BARREIRA ACÚSTICA NO MODELO COMPUTACIONAL

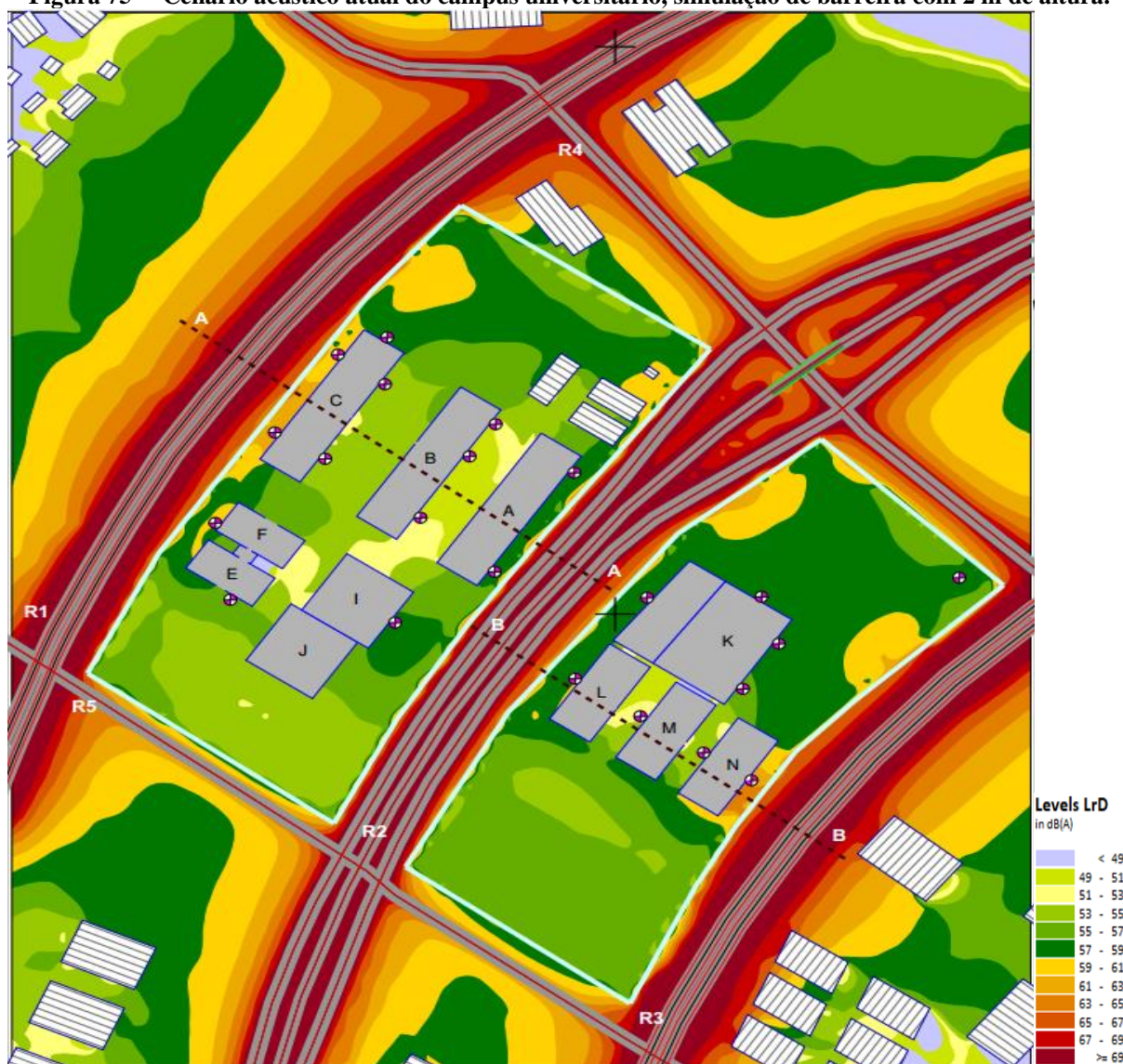
Para o cálculo de atenuação da barreira acústica, configurou-se o parâmetro de avaliação a uma altura de 1,5 metro (um metro e meio) em relação ao nível do solo, conforme as exigências mínimas de altura padronizada pela Comunidade Europeia (DIRECTIVE 2002/49/EC; WG-AEN - *European Commission Working Group Assessment of Exposure to Noise*, 2007).

4.8.1 Simulação da Barreira Acústica com Dois Metros de Altura

A primeira altura adotada para a simulação de atenuação sonora da barreira foi 2 (dois) metros acima do nível do solo. Houve a necessidade para todas as configurações das simulações de informar ao *software* para manter a altura constante (*Constant element height – Geo-Database*), pois, com o desnível existente na topografia do terreno, ou seja, as curvas de nível, poderia variar a altura da barreira de um ponto para outro em sua extensão, apresentado segmentos mais altos e/ou mais baixos do que as alturas estabelecidas para este estudo.

A Figura 75 apresenta a barreira acústica implementada no modelo de cálculo, sendo este o cenário atual do campus universitário. O mapa de ruído com a inserção da barreira acústica teve como intuito verificar a eficiência por meio de comparação com e sem barreira em torno da área em estudo.

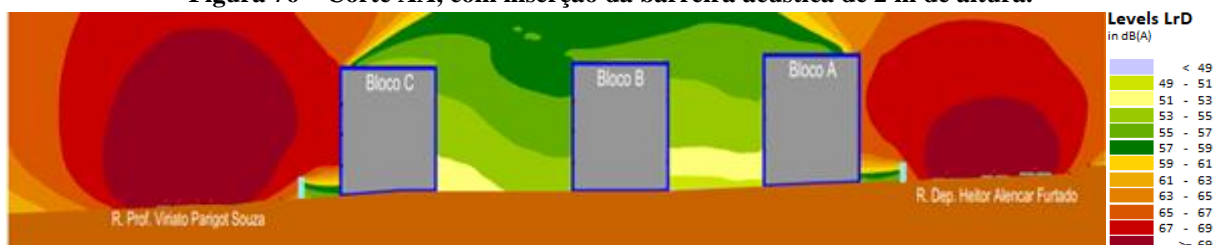
Figura 75 – Cenário acústico atual do campus universitário, simulação de barreira com 2 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

Após realizar o cálculo de atenuação sonora da barreira com dois metros de altura, observou-se que, além de considerar as propriedades físicas relacionadas ao controle do ruído como absorção, reflexão e difração sonora, também é preciso levar em consideração a altura da barreira acústica (Figura 76).

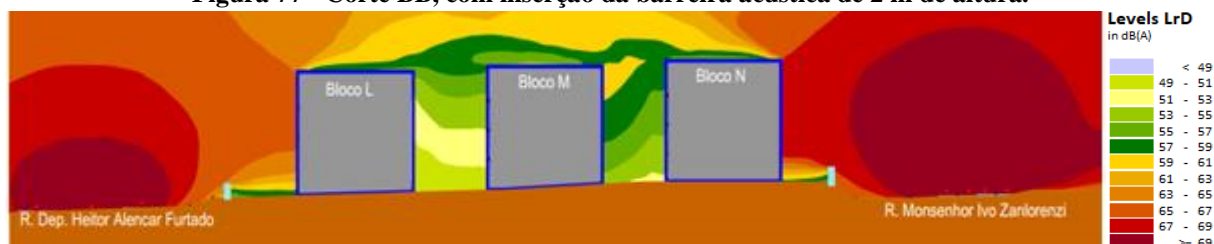
Figura 76 – Corte AA, com inserção da barreira acústica de 2 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

Por meio das Figuras 76 e 77, nota-se que a barreira gera uma zona de sombra acústica e o receptor recebe energia sonora difratada pelo topo da barreira, assim, ficou evidente para este estudo, que o cálculo da perda de inserção envolve, além de atenuação por absorção, também a atenuação sonora por difração.

Figura 77 - Corte BB, com inserção da barreira acústica de 2 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

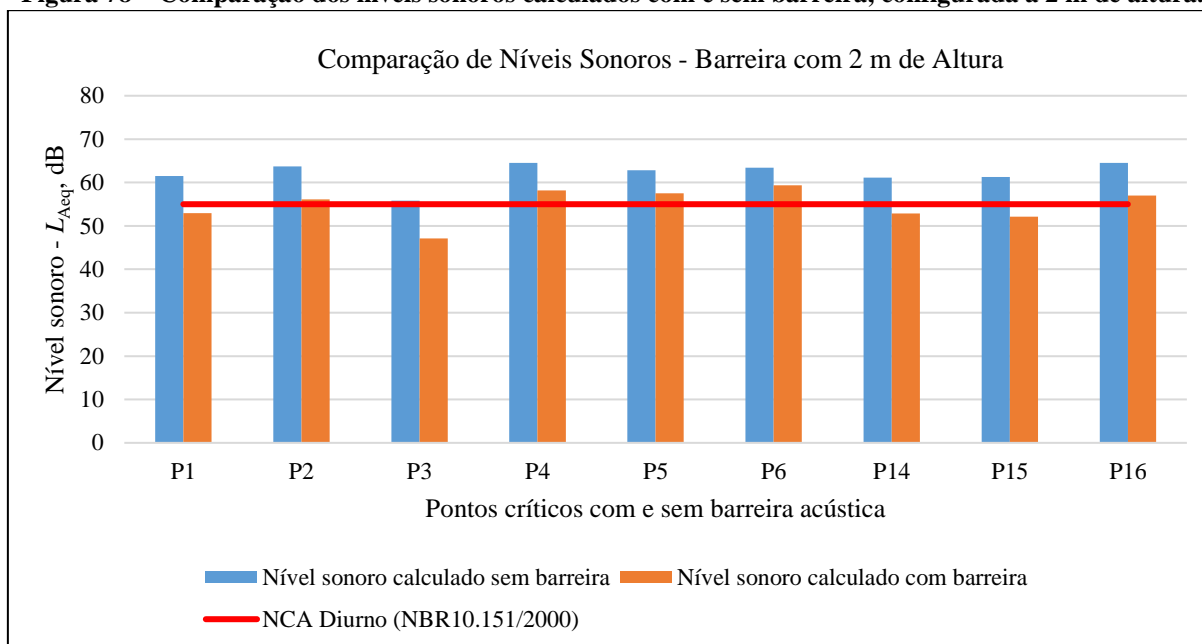
De acordo com os resultados calculados no *software*, a barreira configurada a dois metros de altura não chegou a apresentar uma atenuação de 10 dB. Os valores obtidos podem ser observados no Quadro 13 e na Figura 78.

Quadro 13 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira acústica de 2 m de altura em torno do câmpus universitário.

Comparação do nível sonoro equivalente com e sem barreira acústica [2 metros]				
Pontos próximos a vias de tráfego	Nível sonoro calculado sem barreira [dB]	Atenuação (inserção barreira) [dB]	Nível sonoro calculado com barreira [dB]	NCA Diurno (NBR 10151:2000) [dB]
P1	61,5	8,5	53,0	55
P2	63,7	7,6	56,1	55
P3	55,8	8,7	47,1	55
P4	64,5	6,3	58,2	55
P5	62,8	5,3	57,5	55
P6	63,4	4,0	59,4	55
P14	61,1	8,2	52,9	55
P15	61,3	9,2	52,2	55
P16	64,5	7,5	57,0	55

Fonte: Autora (2018).

Figura 78 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira, configurada a 2 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

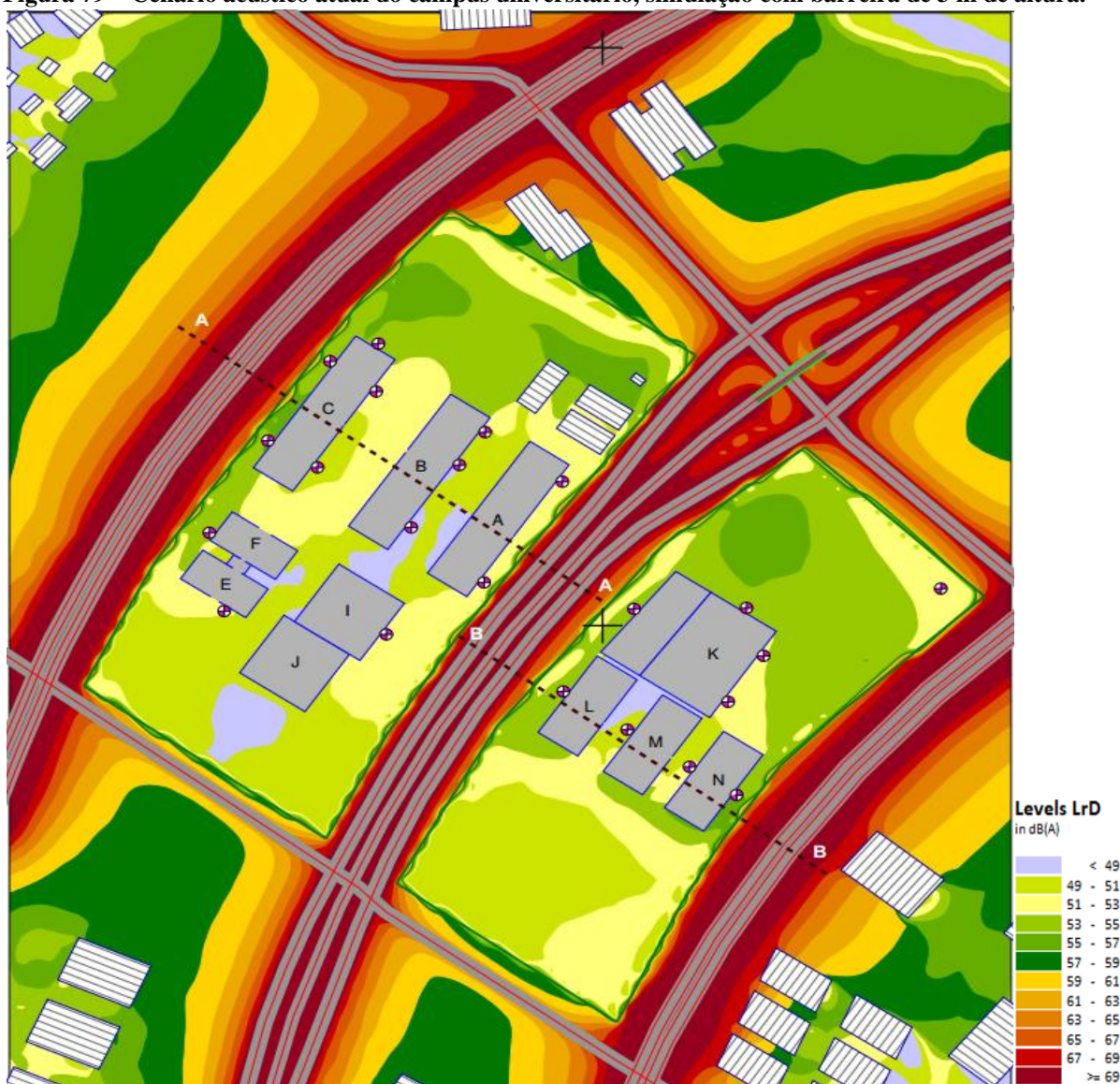
Reduzir as emissões do ruído na fonte seria a maneira mais eficiente de controle acústico, porém neste caso, o local mais comum para atenuação está no caminho de transmissão entre a fonte sonora (vias de tráfegos de veículos) e o receptor (blocos acadêmicos).

Portanto, realizou-se também a simulação com barreira acústica de três metros de altura, já que os resultados da simulação com dois metros de altura não apresentaram níveis sonoros satisfatórios de acordo com a norma técnica e lei municipal.

4.9 SIMULAÇÃO DA BARREIRA ACÚSTICA COM TRÊS METROS DE ALTURA

A Figura 79 e o APÊNDICE D apresentam a barreira acústica implementada no modelo de cálculo. O mapa de ruído com a inserção da barreira acústica teve como intuito verificar a eficiência por meio de comparação com e sem barreira em torno da área em estudo.

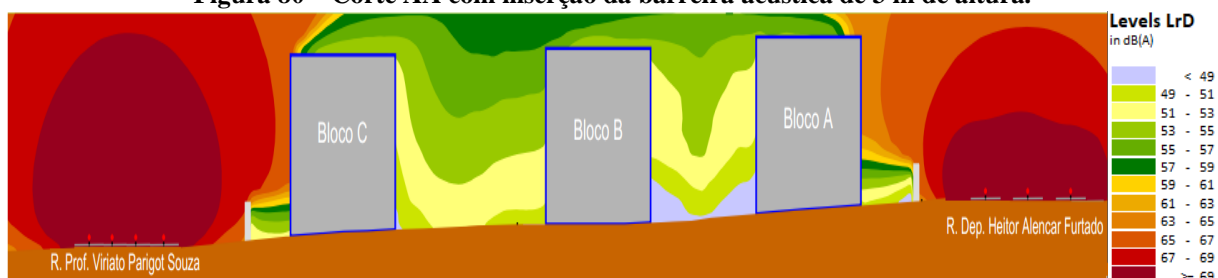
Figura 79 – Cenário acústico atual do câmpus universitário, simulação com barreira de 3 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

A Figura 80 ilustra o detalhe da barreira acústica no plano vertical. Verifica-se que a barreira acústica de bloco de concreto a 3 metros de altura pode ser considerada eficiente nos primeiros pavimentos (térreo e 1º andar) dos blocos acadêmicos, e nos demais pavimentos (2º e 3º andar) o nível sonoro tem uma tendência à diminuição, porém, ainda permanece um pouco acima do limite recomendado pela NBR 10151:2000, que é de 55 dB.

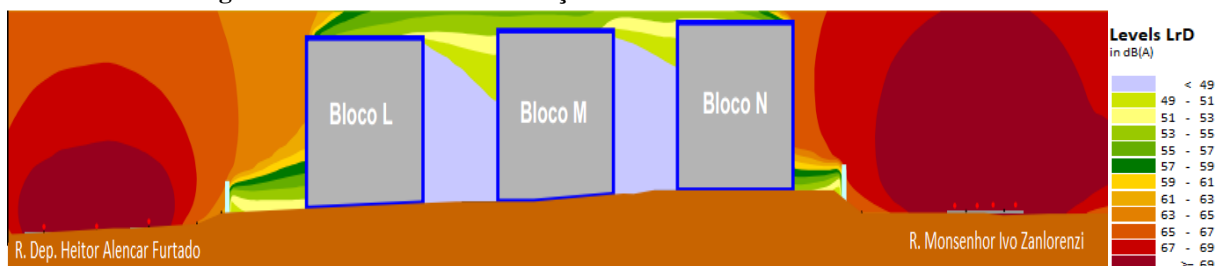
Figura 80 – Corte AA com inserção da barreira acústica de 3 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

Pela observação realizada de atenuação sonora da barreira acústica com três metros de altura, pode-se verificar uma melhor atenuação quando comparada à barreira com altura de dois metros, conforme ilustra de forma gráfica os cortes AA e BB (Figuras 80 e 81).

Figura 81 – Corte BB com inserção da barreira acústica de 3 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

Para análise da eficiência da barreira, avaliou-se somente os receptores considerados críticos, conforme apresenta o Quadro 14 e a Figura 82. Observa-se por meio da avaliação quantitativa o desempenho acústico associado à implementação da barreira, os pontos receptores calculados estão apresentando níveis sonoros abaixo do limite estabelecido pela norma NBR 10151:2000, isto é, NCA (nível de critério de avaliação) de 55 dB.

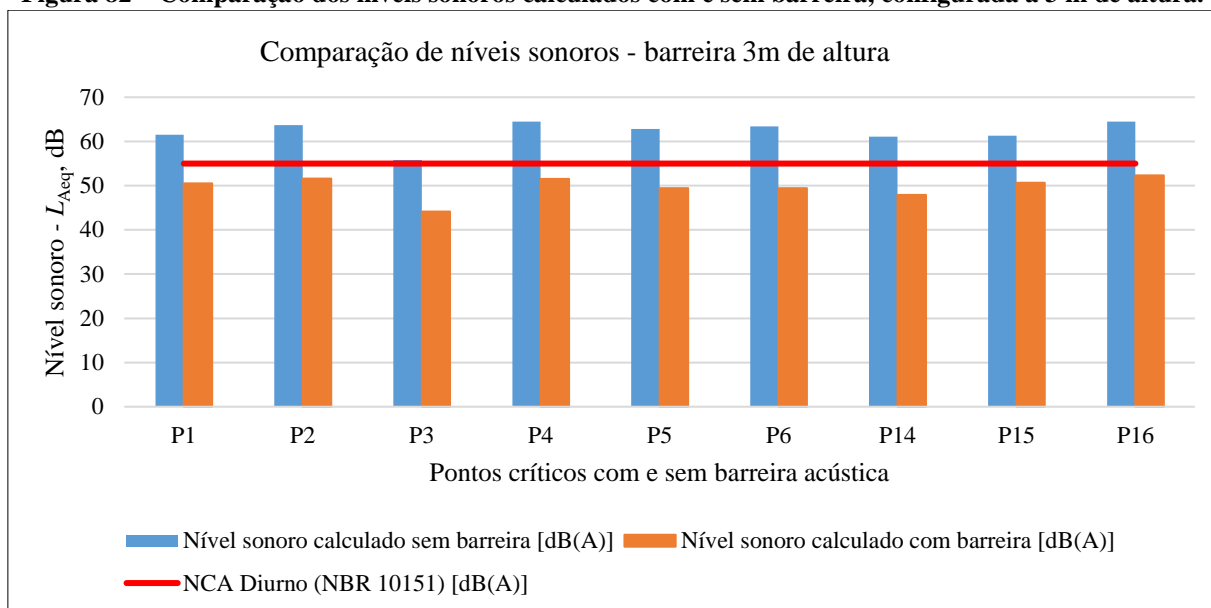
Assim sendo, onde o limite ou os níveis de ruído estão dentro da margem estabelecida pela norma, nenhum outro controle de ruído é necessário. Estes resultados de avaliação sonora são referentes às mesmas configurações adotadas *in loco*, ou seja, os receptores estão afastados dois metros das edificações a uma altura de 1,2 metro em relação ao nível do solo.

Quadro 14 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira acústica de 3 m de altura em torno da universidade.

Comparação do nível sonoro com e sem barreira acústica [3 metros]				
Pontos próximos a vias de tráfego	Nível sonoro calculado sem barreira [dB]	Atenuação (inserção barreira) [dB]	Nível sonoro calculado com barreira [dB]	NCA Diurno (NBR 10151) [dB]
P1	61,5	10,9	50,5	55
P2	63,7	12,1	51,6	55
P3	55,8	11,6	44,1	55
P4	64,5	12,9	51,5	55
P5	62,8	13,3	49,4	55
P6	63,4	13,9	49,4	55
P14	61,1	13,1	47,9	55
P15	61,3	10,6	50,6	55
P16	64,5	12,1	52,3	55

Fonte: Autora (2018).

Figura 82 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira, configurada a 3 m de altura.



Fonte: Autora (2018).

A seguir estão apresentados os resultados calculados para cada altura da barreira acústica (2 e 3 metros), sendo a altura a única variável que as diferenciam, mantendo-se o mesmo material e os mesmos parâmetros acústicos definidos anteriormente. Apenas foram configuradas estas alturas para simulação, pois, como visto em diversas pesquisas, considerou-se a sensação de perda de luz natural e/ou a sensação de confinamento no interior do câmpus universitário.

4.10 COMPARAÇÃO DA REDUÇÃO DE RUÍDO POR MEIO DA MODELAGEM DE BARREIRA ACÚSTICA

Os resultados apresentados a seguir foram gerados a partir de cada mapa de ruído, ilustrando a influência da barreira acústica em cada ponto receptor. Assim, é possível obter uma indicação da melhora adquirida pela inserção da barreira acústica em termos objetivos por meio de comparação, usando o programa de simulação. Os mapas elaborados apresentam níveis sonoros medidos na grandeza L_{Aeq} , dB, conseqüentemente, teve-se um total de três mapas desenvolvidos, sendo um mapa sem barreira acústica, um com barreira acústica de 2 metros e um com 3 metros de altura.

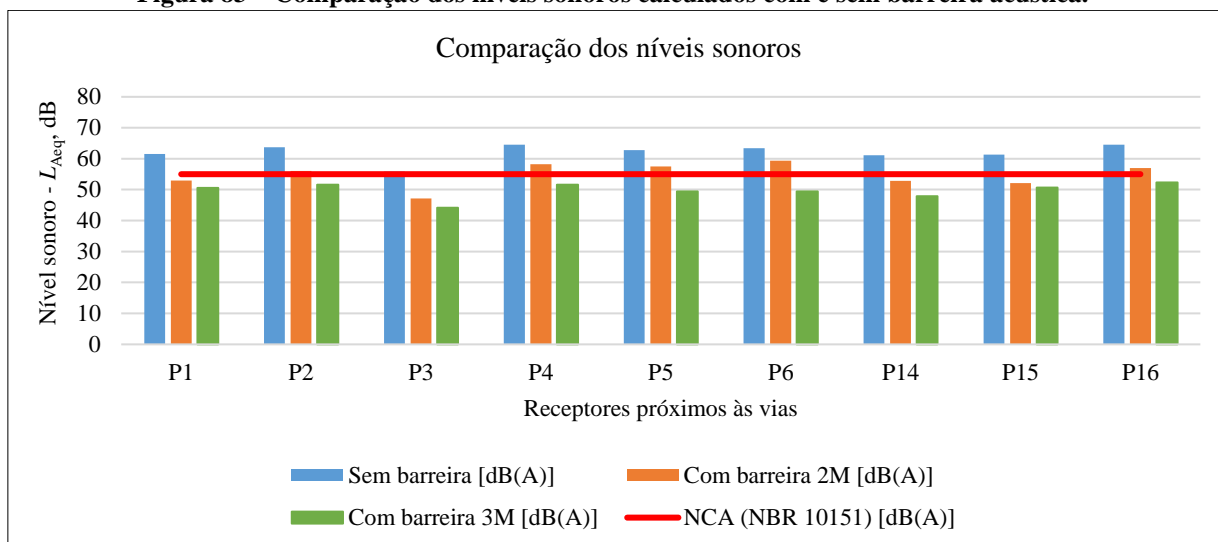
Conforme indicado no Quadro 15 e na Figura 83, em geral, os níveis de ruído nos pontos receptores foram amplamente reduzidos com o aumento da altura da barreira acústica, com melhor desempenho entre não ter barreira ou uma barreira de 2 metros.

Quadro 15 – Resumo dos resultados calculados em cada cenário com e sem barreira acústica.

Pontos receptores	Sem barreira [dB]	Com barreira 2M [dB]	Com barreira 3M [dB]	NCA (NBR 10151) [dB]
P1	61,5	52,9	50,5	55
P2	63,7	56,1	51,6	55
P3	55,8	47,1	44,1	55
P4	64,5	58,1	51,5	55
P5	62,8	57,5	49,4	55
P6	63,4	59,3	49,4	55
P14	61,1	52,8	47,9	55
P15	61,3	52,1	50,6	55
P16	64,5	57,0	52,3	55

Fonte: Autora (2018).

A avaliação foi realizada conforme estabelecido pela norma NBR 10151:2000, que permite um limite máximo de 55 dB para a área em estudo no período diurno, conforme ilustra a Figura 83.

Figura 83 – Comparação dos níveis sonoros calculados com e sem barreira acústica.

Fonte: Autora (2018).

Portanto, à luz dos resultados desta investigação, assim como os destacados na revisão bibliográfica, mostra que a primeira etapa de elaboração de mapas acústicos é importante para desenvolver medidas eficazes e sustentáveis de redução do ruído. O mapeamento sonoro oferece uma oportunidade de planejamento, pois, tornou-se evidente que a simulação com a inserção de barreira é capaz de capturar os comportamentos de propagação sonora em torno de barreira acústica nas proximidades de tráfegos de veículos.

Deve ser destacado que, o estudo abordado nesta tese apresenta técnicas para serem aplicadas no mapeamento de ruído urbano, o que auxilia na coleta de dados e na definição da comunidade alvo. Tais técnicas podem ser adaptadas para projetos futuros, tanto para mapa acústico quanto para barreiras, sendo esta, uma proposta como opção para controle de ruído e sustentabilidade.

4.11 EXPERIMENTO FATORIAL: ANÁLISE DA INFLUÊNCIA ENTRE OS FATORES DE ABSORÇÃO SONORA E ALTURA DA BARREIRA

Nesta etapa, realizou-se um experimento fatorial com dois fatores, quatro combinações, nove réplicas e trinta e seis experimentos, conforme Quadro 16. A matriz do planejamento experimental, encontra-se com ambos os níveis codificados em (-1) e (+1).

No entanto, o experimento constituiu em determinar a influência do coeficiente de absorção sonora e da altura da barreira acústica em relação à atenuação do ruído em torno da universidade, mais especificamente, os pontos receptores próximos às vias de tráfego de veículos.

Quadro 16 – Planejamento fatorial: C5 fator coeficiente de absorção sonora; C6 fator altura da barreira; C7 resposta de atenuação sonora da simulação no SoundPlan.

PLANEJAMENTO PARA EXECUTAR O EXPERIMENTO FATORIAL							
Experimento	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	Ordem	Corrente	Ponto central	Blocos	X1	X2	Atenuação
1	1	1	1	1	0,2	2	6,74
2	2	2	1	1	0,5	2	7,42
3	3	3	1	1	0,2	4	12,21
4	4	4	1	1	0,5	4	13,28
5	5	5	1	1	0,2	2	6,95
6	6	6	1	1	0,5	2	7,71
7	7	7	1	1	0,2	4	14,09
8	8	8	1	1	0,5	4	15,01
9	9	9	1	1	0,2	2	7,82
10	10	10	1	1	0,5	2	8,73
11	11	11	1	1	0,2	4	13,38
12	12	12	1	1	0,5	4	14,32
13	13	13	1	1	0,2	2	10,06
14	14	14	1	1	0,5	2	10,07
15	15	15	1	1	0,2	4	14,98
16	16	16	1	1	0,5	4	15,66
17	17	17	1	1	0,2	2	11,51
18	18	18	1	1	0,5	2	11,7
19	19	19	1	1	0,2	4	14,54
20	20	20	1	1	0,5	4	15,18
21	21	21	1	1	0,2	2	12,75
22	22	22	1	1	0,5	2	12,76
23	23	23	1	1	0,2	4	15,51
24	24	24	1	1	0,5	4	15,55
25	25	25	1	1	0,2	2	11,60
26	26	26	1	1	0,5	2	11,63
27	27	27	1	1	0,2	4	14,77
28	28	28	1	1	0,5	4	14,83
29	29	29	1	1	0,2	2	6,94
30	30	30	1	1	0,5	2	7,55
31	31	31	1	1	0,2	4	12,38
32	32	32	1	1	0,5	4	13,26
33	33	33	1	1	0,2	2	6,52
34	34	34	1	1	0,5	2	6,60
35	35	35	1	1	0,2	4	15,22
36	36	36	1	1	0,5	4	16,43

Fonte: Autora (2019).

O planejamento fatorial com os 36 experimentos, um para cada ponto receptor (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P14, P15, P16), total de nove pontos receptores fazem parte do experimento fatorial. Os 36 tratamentos contidos no experimento foram formados por 9 réplicas.

No Apêndice E, encontra-se os resultados de cada simulação. Para atender aos requisitos da análise fatorial, realizou-se simulações da barreira acústica no *software SoundPlan* com as seguintes configurações:

1ª simulação: barreira com 2 metros de altura e coeficiente de absorção $\alpha = 0,2$;

2ª simulação: barreira com 2 metros de altura e coeficiente de absorção $\alpha = 0,5$;

3ª simulação: barreira com 4 metros de altura e coeficiente de absorção $\alpha = 0,2$;

4ª simulação: barreira com 4 metros de altura e coeficiente de absorção $\alpha = 0,5$.

Para realizar a análise dos experimentos com o propósito de estimar os efeitos principais, bem como analisar a interação entre os fatores, inseriu-se os dados do Quadro 16, em planilha eletrônica do *software Minitab*. Com o intuito de verificar estatisticamente a variação dos resultados experimentais, utilizou-se a ferramenta de análise de variância fatorial mantendo o nível de significância de 0,05 (α), comumente aplicado em análise de variância.

A Tabela 14 apresenta os resultados do experimento fatorial referente aos fatores coeficiente de absorção (X1), e altura da barreira (X2). Observando os resultados do experimento, constatou-se que há efeito significativo para o fator altura (X1, $F = 73,38$; $p = 0,000$), valor-P menor que o nível de significância estabelecido de 0,05, e não significativo para o coeficiente de absorção sonora, pois o valor-P é maior que alfa (X2, $F = 0,08$; $p = 0,390$).

Quanto ao resultado da interação entre altura e coeficiente de absorção, nota-se que não há interação entre os fatores (X1*X2, $F = 0,08$; $p = 0,779$). Quanto maior o valor-F, e, conseqüentemente menor o valor-P, maior será a significância do fator. Observa-se também que tem uma associação entre os valores-T e a estatística F, comprovando estatisticamente quando eleva ao quadrado os valores-T dos fatores X1, X2 e X1*X2.

A análise estimativa dos efeitos mostra que uma altura de barreira de 2 metros para uma altura de 4 metros, proporciona um ganho em média de 5,3 dB na atenuação sonora da barreira acústica, então se o interesse é maximizar a atenuação, compensa aumentar a altura. Uma vez que, o resultado da análise sobre o coeficiente de absorção apresentou um ganho de apenas 0,54 dB na atenuação sonora acústica.

Antes de realizar o experimental fatorial e a análise estatística, o experimentador pode observar que os fatores X1 e X2 se diferem entre si, porém, neste caso foi de interesse saber as possíveis diferenças na resposta média para os dois fatores, usando o intervalo de confiança na diferença das médias para responder à observação do pesquisador. E também, o fato de realizar

o experimento fatorial teve como propósito compreender como a variável resposta é afetada pela variação da interação e do efeito principal.

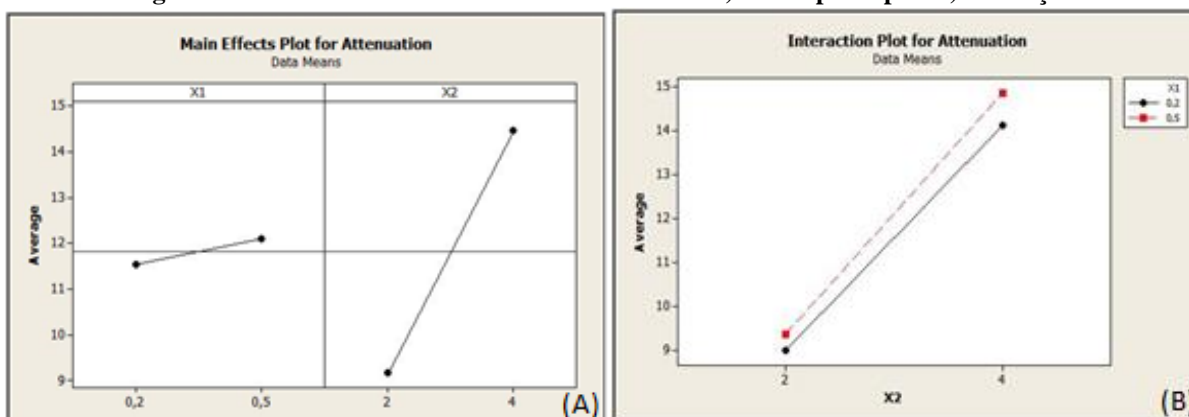
Tabela 14 – Análise da variância dos efeitos principais e da interação entre os fatores. *Coef*: Determina a inclinação do efeito procurado (magnitude do efeito); *SE Coef*: Erro padrão; *DF*: Grau de liberdade; *Adj SS*: Soma dos quadrados; *Adj MS*: média dos quadrados dos erros (variância do erro); Valores *T*, *F* e *P*: Testes estatísticos.

Fatorial completo					
Fatores:	2	Projeto base:	2;4		
Corrente:	36	Replicações:	9		
Blocos:	1	Pontos centrais (Total):	0		
Ajuste fatorial: Atenuação versus X1; X2					
Efeitos e coeficientes estimados para Atenuação (unidades codificadas)					
Termo	Efeito	Coef	SE Coef	T	P
Constante		11,8239	0,3098	38,17	0,000
X1	0,5400	0,2700	0,3098	0,87	0,390
X2	5,3078	2,6539	0,3098	8,57	0,000
X1*X2	0,1756	0,0878	0,3098	0,28	0,779
Análise de variância para atenuação (unidades codificadas)					
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	F	P
Efeitos principais	2	256,177	128,088	37,07	0,000
X1	1	2,624	2,624	0,76	0,390
X2	1	253,553	253,553	73,38	0,000
2- Interações	1	0,277	0,277	0,08	0,779
X1*X2	1	0,277	0,277	0,08	0,779
Erro residual	32	110,564	3,455		
Erro	32	110,564	3,455		

Fonte: Autora (2019).

A Figura 84 apresenta o resultado dos dois fatores separadamente com seus efeitos principais (Figura 84A), e a interação entre os fatores (Figura 84B). A atenção deve ser dada ao efeito X2 (altura), haja vista que não há significância no efeito X1 (coeficiente de absorção sonora), assim como, não há interação significativa entre os fatores (X1 e X2). Conclusões a partir de um nível de confiança de 95%.

Figura 84 – Resultado entre as médias dos fatores. A) Efeito principal. B) Interação.



Fonte: Autora (2019).

5 BLOCOS DE CONCRETO DE RCD PARA SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA

Neste capítulo, estão apresentados os resultados sobre a produção, preparação de amostras, ensaio acústico e simulação computacional referente ao bloco de concreto de resíduos de construção e demolição (RCD).

Ademais está apresentada uma comparação dos NRCs (*Noise Reduction Coefficient*) com o bloco de concreto convencional (bloco de mercado). Os valores dos blocos convencionais foram pesquisados na literatura, na base de dados do *software SoundPlan*, e também, realizou-se ensaio acústico, mesmo processo executado com o bloco de concreto de RCD, em um tubo de impedância no laboratório de acústica do departamento de engenharia mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Tem-se como propósito apresentar simulação de barreira acústica de blocos de concreto de RCD, e comparar com o bloco convencional que já se encontra disponível na biblioteca do *SoundPlan*. Para tal, caracterizou-se o novo material pelo seu coeficiente de absorção sonora (α) e o NRC (*Noise Reduction Coefficient*), e inseriu-se na base de dados do programa. No entanto, apenas um panorama da produção e medição acústica dos blocos de concreto foram abordadas.

5.1 PRODUÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO DE RCD

A seguir, apresenta-se os processos adotados para a produção dos blocos de concreto de resíduos de construção e demolição (RCD).

- **Coleta:** Os materiais necessários para a produção de blocos RCD foram doados por uma usina de processamento de resíduos da construção civil, situada na cidade de Campo Largo, Paraná. Segundo as informações dadas pela empresa o material produzido é isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concretos, rocha natural, argamassas e resíduos cerâmicos da construção civil. Ainda de acordo com a empresa de reciclagem, um aspecto muito importante é que os materiais produzidos estão de acordo com a norma brasileira NBR 15116:2004, que define os requisitos dos agregados reciclados para a utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural.
- **Peneiramento:** O pedrisco e a areia (resíduos da construção e demolição) passaram por peneiramento, este processo tem como objetivo obter granulometria e homogeneidade

dos agregados. O pedrisco foi retido em uma peneira de 4,75 milímetros e a areia foi retida em uma peneira de 2,36 milímetros.

- **Secagem:** Os resíduos foram secos em estufa a 105°C por vinte e quatro horas ou até atingir a estabilidade da massa.
- **Pesagem:** A pesagem dos agregados (RCD) ocorreu conforme as composições definidas em balança de precisão com duas casas decimais (grama).
- **Mistura:** Após a pesagem de cada composição, as mesmas foram misturadas em betoneiras para obter a homogeneização. A composição é o traço, o qual é a proporção entre água, cimento e agregados. Realizou-se a preparação das misturas de concreto de acordo com o que preconiza a norma NBR 12821:2009 (Preparação de concreto em laboratório - Procedimento, por meio de betoneira de eixo inclinado).
- **Vibro prensagem:** Após a mistura das composições ocorreu o processo de compactação em uma vibro prensa pneumática, com capacidade de prensagem de 500 kgf/cm², onde os blocos de concreto tomam forma por meio de moldes.
- **Cura:** O processo de cura ocorreu em ambiente livre de insolação direta e de vento.
- **Capeamento:** Capeamento das superfícies dos blocos para teste de compressão.
- **Ensaio:** Realizou-se o teste de compressão axial – análise de resistência. Os ensaios foram realizados aos 7 dias, após o processo de cura, e aos 28 dias para se avaliar o ganho de resistência ao longo do tempo.
- **Armazenamento:** Os blocos foram armazenados no laboratório de acústica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Os blocos de concreto de RCD foram comparados com os blocos de concreto convencionais nos testes de resistências à compressão axial, os quais apresentam as seguintes características: os blocos de concreto de RCD com dimensões de 14x19x39 centímetros atingiram uma média de 3,05 Mpa, com peso médio de 11,85 quilos, massa específica média de 2.018,84 kg/m³ e taxa de absorção de 14,49%. Os blocos de concreto convencionais disponível no mercado com dimensões de 14x19x39 centímetros atingiram uma resistência à compressão axial média de 4,15 MPa, tendo um peso médio de 9,22 quilos e uma massa específica de 2.428,57 kg/m³.

Os resultados apresentados pelo bloco de resíduos da construção atendem a norma NBR 6136:2016, assim, pode-se utilizar como bloco de vedação. A Figura 85 apresenta os blocos de RCD que fizeram parte desta pesquisa.

Figura 85 – Blocos de concreto de RCD produzidos no laboratório de materiais da UTFPR.



Fonte: Autora (2019).

Deve-se ressaltar que os blocos de resíduos (RCD) foram produzidos com processo manual, exclusivamente, com o objetivo de avaliação de protótipo para identificar as deficiências e propor melhorias, referentes às propriedades mecânicas e à propriedade acústica (coeficiente de absorção sonora do material).

5.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE ACÚSTICA

Nesta etapa foram extraídas amostras do bloco de concreto de RCD e o do bloco convencional (bloco de concreto comercial). Objetivando a comparação do coeficiente de absorção sonora (α) entre as amostras, bem como, a comparação do coeficiente de absorção (α) do bloco convencional com o publicado na literatura. A Figura 86 apresenta os blocos de concreto.

Figura 86 – Blocos de RCD e convencional. A) Blocos de concreto de RCD produzidos no laboratório da UTFPR. B) Blocos de concreto convencional (comercial).



Fonte: Autora (2019).

As amostras foram retiradas diretamente dos blocos de concreto de RCD e convencional. Para tanto, foi necessário neste processo utilizar uma serra copo diamantada para concreto, com diâmetro interno de 59 milímetros, conforme ilustra a Figura 87.

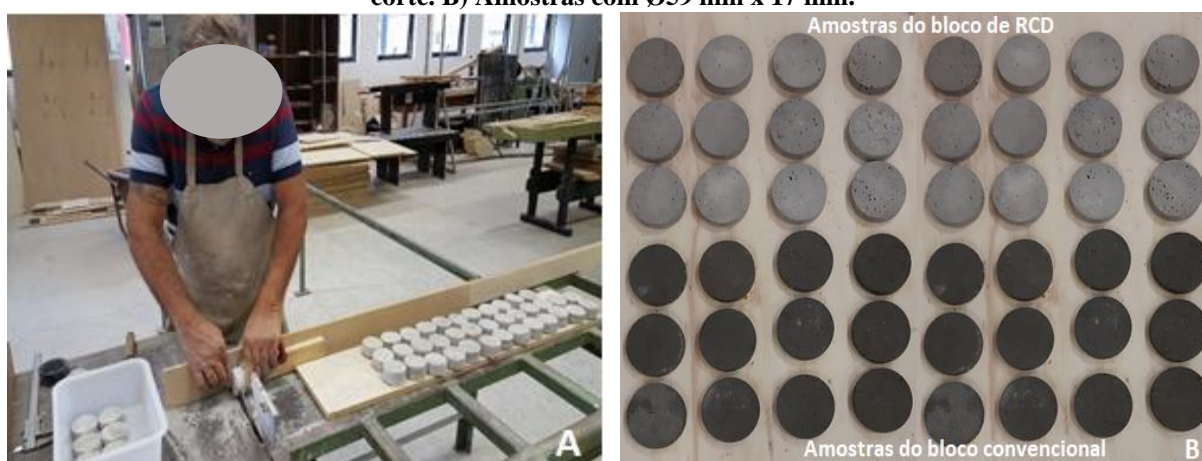
Figura 87 – Preparo das amostras para ensaio de absorção sonora. A) Montagem do bloco na furadeira de bancada. B) Extração da amostra com a serra copo.



Fonte: Autora (2019).

Aproximadamente cinquenta amostras foram extraídas dos blocos de concreto para análise acústica, mais especificamente, para obtenção do coeficiente de absorção sonora. A Figura 88 ilustra as amostras sendo cortadas em um disco de corte para que as mesmas ficassem com espessura de aproximadamente 17 milímetros. As dimensões de $\text{Ø}59$ mm por 17 mm de espessura foram necessárias para realizar as medições de coeficiente de absorção sonora em um tubo de impedância.

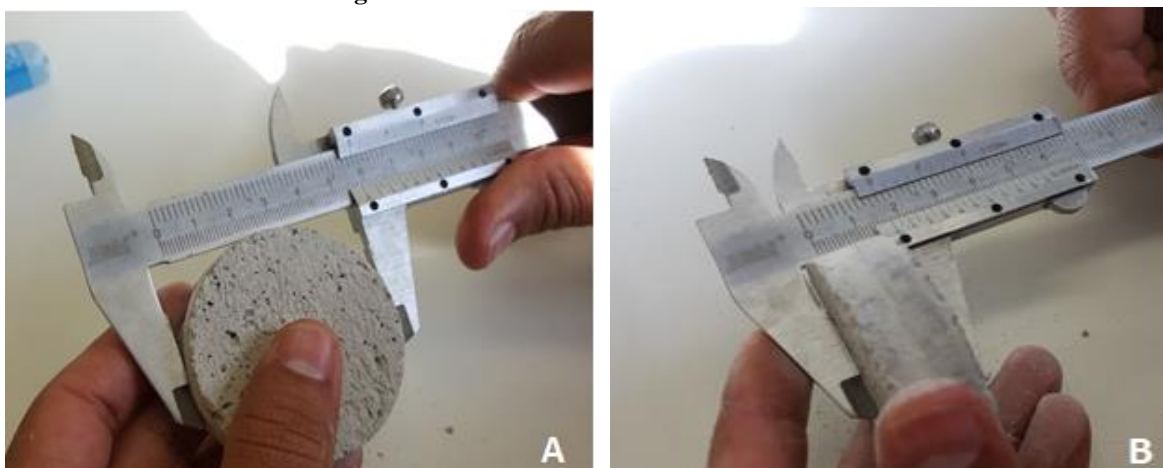
Figura 88 – Preparo das amostras para ensaio de absorção sonora. A) Amostras cortadas em disco de corte. B) Amostras com $\text{Ø}59$ mm x 17 mm.



Fonte: Autora (2019).

Realizou-se a conferência de cada amostra, com um paquímetro, para verificar o diâmetro e espessura, conforme apresenta a Figura 89.

Figura 89 – Amostras cortadas em disco de corte.



Fonte: Autora (2019).

Após a preparação das amostras, as mesmas passaram por análise de densidade aparente (μ), sendo esta, uma propriedade física que resulta da divisão da massa compacta de uma substância pelo volume que a mesma ocupa. Para tanto, utilizou-se a Equação 18:

$$D = \frac{M}{V} \quad (18)$$

onde:

D: densidade aparente (kg/m^3);

M: massa (Kg);

V: volume (m^3).

5.2.1 Métodos Aplicados para Obtenção da Massa Específica das Amostras

O primeiro passo foi a pesagem das amostras, na sequência analisou a quantificação do volume e por último o cálculo da massa específica, com o auxílio dos seguintes materiais:

- Balança, com erro sistêmico de 0,01 grama;
- Cilindro graduado em polietileno (1000 ml);
- Pisseta graduada em polietileno (500 ml);
- Espátula com 10 cm;
- Água 500 ml;
- Prancheta de anotações.

A Figura 90 demonstra as etapas de pesagem e medição do volume das amostras de concreto de RCD (Resíduos de Construção e Demolição).

Figura 90 – Preparo das amostras para obter a massa específica. A) Pesagem das amostras. B) Medição do volume das amostras.



Fonte: Autora (2019).

5.3 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO DAS AMOSTRAS DOS BLOCOS DE RDC

O Quadro 17 apresenta as características de cada amostra de RCD que fez parte do ensaio de absorção sonora. As mesmas não possuem homogeneidade devido à compactação manual dos blocos de concreto e também por ser um material rígido (a compactação é necessária para obter menor índice de vazios). Os dados característicos de cada amostra podem interferir no comportamento do ensaio acústico, dificultando atingir um valor constante do coeficiente de absorção sonora para cada frequência.

Nota-se que a média de densidade das amostras de RCD foi de $1708,125 \text{ kg/m}^3$. O mesmo processo realizado com as amostras do bloco convencional apresentou uma densidade média de $1880,013 \text{ kg/m}^3$ (APÊNDICE F).

Quadro 17 – Características de cada amostra para ensaio de coeficiente de absorção sonora.

Características das amostras de RCD						
Amostra	Altura [m]	Diâmetro [m]	Volume [m ³]	Massa [g]	Massa [kg]	Densidade [kg/m ³]
1	0,0172	0,059	0,000047	80	0,080	1699,601
2	0,0176	0,059	0,000048	84	0,084	1745,712
3	0,0174	0,059	0,000047	82	0,082	1727,044
4	0,0168	0,059	0,000046	77	0,077	1679,771
5	0,0174	0,059	0,000047	77	0,077	1623,295
7	0,0172	0,059	0,000047	83	0,083	1763,336
8	0,0164	0,059	0,000045	80	0,080	1780,617
10	0,0172	0,059	0,000047	79	0,079	1684,880
12	0,0169	0,059	0,000046	78	0,078	1686,498
13	0,0171	0,059	0,000047	81	0,081	1729,216
14	0,0173	0,059	0,000047	82	0,082	1735,371
15	0,0173	0,059	0,000047	82	0,082	1732,031
16	0,0169	0,059	0,000046	76	0,076	1643,255
17	0,0176	0,059	0,000048	82	0,082	1709,003
18	0,0170	0,059	0,000046	77	0,077	1658,341
20	0,0173	0,059	0,000047	82	0,082	1732,031
Média	0,0172	0,059	0,000047	80	0,080	1708,125

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

O ensaio acústico para medir o coeficiente de absorção (α) foi realizado em um tubo de impedância (exposto no capítulo 3), para proceder à análise das curvas de absorção sonora. Os resultados estão apresentados em bandas de oitava (250 a 2000Hz) e terços de oitava (200 a 3150 Hz). Os valores em terço de oitava estão apresentados em apêndices (APÊNDICE G e APÊNDICE H).

5.3.1 Coeficiente de Absorção e NRC das Amostras do Bloco Concreto de RDC

Nesta seção os valores de absorção do bloco de concreto de RCD estão apresentados em bandas de oitava. O APÊNDICE G, apresenta os resultados do coeficiente de absorção em terço de oitava.

Após realizar a medição de coeficiente de absorção, encontrou-se o coeficiente de redução sonora (*Noise Reduction Coefficient* – NRC). Um valor único que sintetiza a capacidade de absorção do material em análise, para tal aplicou-se a média aritmética dos coeficientes de absorção sonora em bandas de oitava de 250 a 2000 Hz, obtendo-se um NRC = 0,25 para as amostras de RCD, conforme apresentado no Quadro 18 e na Figura 91.

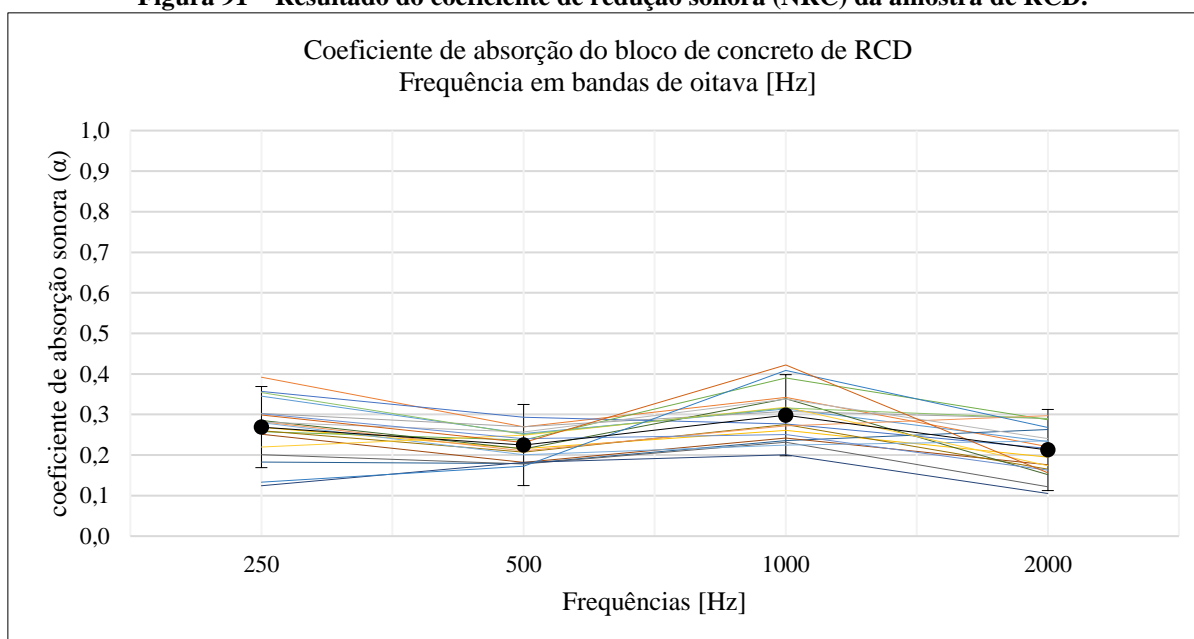
Quadro 18 – Resultado do coeficiente de absorção sonora (α) das amostras de RCD.

Amostras de bloco de concreto de RCD					
Coeficiente de absorção sonora em bandas de oitava					
Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	NRC
Amostra 1	0,35	0,25	0,31	0,23	0,29
Amostra 2	0,39	0,27	0,34	0,22	0,31
Amostra 3	0,30	0,27	0,31	0,29	0,29
Amostra 4	0,27	0,22	0,26	0,19	0,23
Amostra 5	0,36	0,29	0,28	0,22	0,29
Amostra 6	0,26	0,24	0,39	0,29	0,29
Amostra 7	0,18	0,18	0,24	0,26	0,22
Amostra 8	0,25	0,18	0,24	0,18	0,21
Amostra 9	0,20	0,18	0,23	0,12	0,18
Amostra 10	0,26	0,21	0,28	0,17	0,23
Amostra 11	0,12	0,18	0,20	0,11	0,15
Amostra 12	0,29	0,22	0,34	0,15	0,25
Amostra 13	0,28	0,20	0,22	0,23	0,24
Amostra 14	0,28	0,21	0,27	0,30	0,27
Amostra 15	0,28	0,26	0,34	0,24	0,28
Amostra 16	0,22	0,25	0,32	0,17	0,24
Amostra 17	0,30	0,24	0,25	0,16	0,24
Amostra 18	0,35	0,25	0,32	0,29	0,30
Amostra 19	0,13	0,17	0,41	0,27	0,25
Amostra 20	0,30	0,23	0,42	0,16	0,28
Média da frequência (Hz)	0,26	0,22	0,29	0,21	0,25
Desvio padrão da frequência (Hz)	0,07	0,04	0,06	0,06	0,04

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

A Figura 91 ilustra a variabilidade do coeficiente de absorção das amostras do bloco de concreto de RCD. O comportamento da curva não apresenta uma variabilidade relevante, apenas um aumento dos valores do coeficiente de absorção sonora na frequência de 1000 Hz.

Figura 91 – Resultado do coeficiente de redução sonora (NRC) da amostra de RCD.



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

5.3.2 Coeficiente de Absorção e NRC das Amostras do Bloco de Concreto Convencional

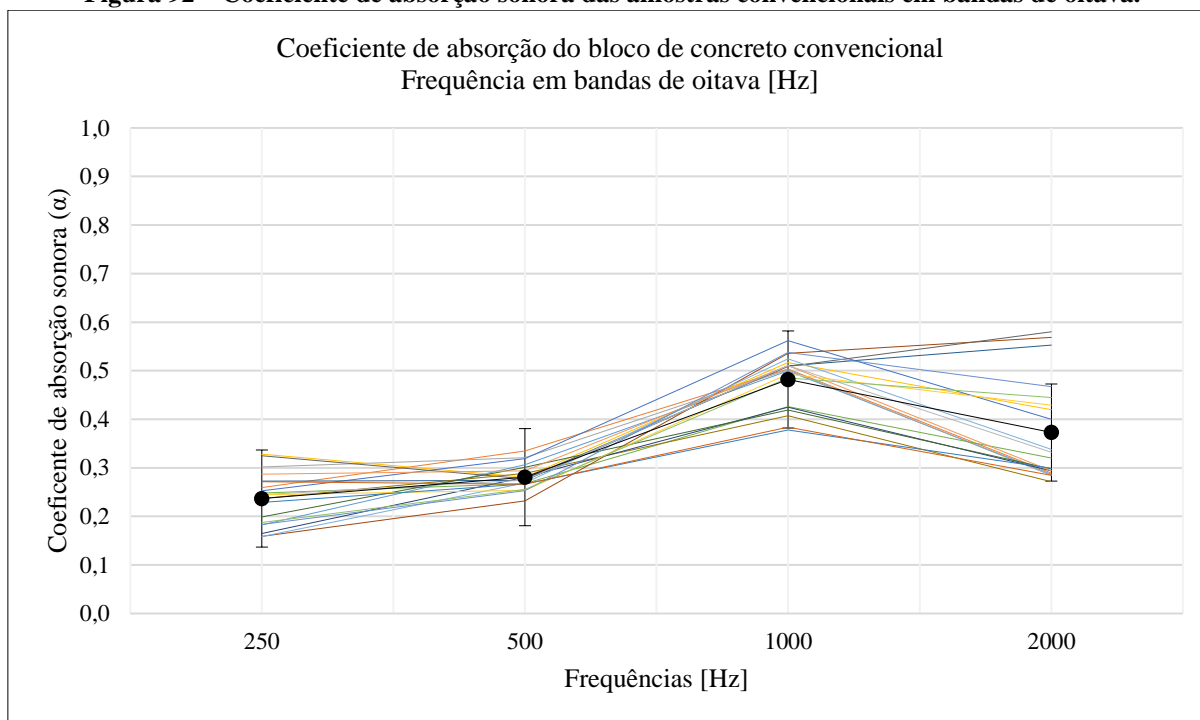
O Quadro 19 e a Figura 92 apresentam os coeficientes de absorção sonora e o NRC, em bandas de oitava, das amostras do bloco convencional (bloco de mercado). O APÊNDICE H, apresenta os resultados do coeficiente de absorção em terço de oitava. A média do coeficiente NRC = 0,34 apresentou um resultado satisfatório quando comparado com outras fontes (biblioteca do *software SoundPlan* e literatura).

Quadro 19 – Resultado do coeficiente de redução sonora (NRC) da amostra do bloco convencional.

Amostras de bloco de concreto convencional					
Coeficiente de absorção sonora em bandas de oitava					
Frequência (Hz)	250	500	1000	2000	NRC
Amostra 1	0,18	0,31	0,50	0,29	0,32
Amostra 2	0,26	0,33	0,50	0,29	0,35
Amostra 3	0,30	0,32	0,50	0,28	0,35
Amostra 4	0,33	0,28	0,52	0,42	0,39
Amostra 5	0,25	0,32	0,56	0,40	0,38
Amostra 6	0,25	0,27	0,43	0,32	0,32
Amostra 7	0,27	0,27	0,51	0,55	0,40
Amostra 8	0,16	0,23	0,54	0,57	0,37
Amostra 9	0,32	0,28	0,51	0,58	0,42
Amostra 10	0,24	0,29	0,41	0,27	0,30
Amostra 11	0,16	0,28	0,42	0,29	0,29
Amostra 12	0,20	0,30	0,42	0,30	0,30
Amostra 13	0,16	0,27	0,52	0,34	0,32
Amostra 14	0,29	0,29	0,51	0,29	0,35
Amostra 15	0,24	0,27	0,51	0,33	0,34
Amostra 16	0,24	0,25	0,49	0,43	0,36
Amostra 17	0,18	0,25	0,54	0,47	0,36
Amostra 18	0,19	0,26	0,49	0,45	0,34
Amostra 19	0,23	0,27	0,38	0,30	0,29
Amostra 20	0,27	0,27	0,38	0,28	0,30
Média da frequência (Hz)	0,23	0,28	0,48	0,37	0,34
Desvio padrão da frequência (Hz)	0,05	0,03	0,05	0,10	0,04

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

A Figura 92 apresenta a variação do coeficiente de absorção sonora, em bandas de oitava, das amostras do bloco de concreto convencional. Nota-se uma linearidade nas baixas frequências, a variabilidade tende a ser maior na frequência de 2000 Hz.

Figura 92 – Coeficiente de absorção sonora das amostras convencionais em bandas de oitava.

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

5.4 COMPARAÇÃO DE NRC DOS BLOCOS DE CONCRETO CONVENCIONAL E DE RCD

A Tabela 15 e a Figura 93 ilustram uma comparação dos coeficientes de redução sonora dos blocos de concreto não pintado. Estes são valores da literatura (NRC = 0,358), da base de dados do *software SoundPlan* (NRC = 0,358), do manual do *software*, definido pela norma RLS:1990 (NRC = 0,206), do bloco convencional medido no laboratório de acústica da UTFPR (NRC = 0,343), e, o mais recentemente estudado nesta pesquisa, bloco de concreto de RCD (NRC = 0,251). Os valores de NRCs indicados são as médias dos coeficientes de absorção sonora do intervalo de frequências de 250 Hz a 2000 Hz.

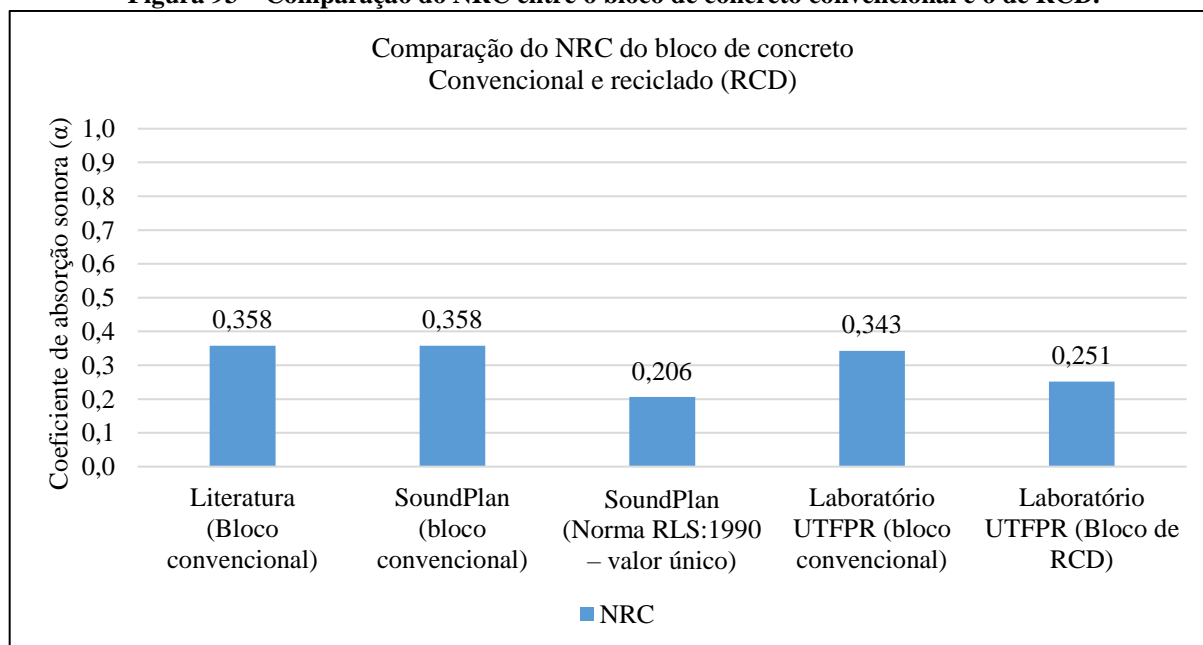
Lembrando-se de que, o coeficiente de absorção e o coeficiente de redução sonora (*Noise Reduction Coefficient* – NRC) varia de 0 a 1. Nota-se que o NRC do bloco de concreto convencional ensaiado no laboratório de acústica da UTFPR, apresentou um valor ligeiramente inferior ao NRC do bloco de concreto publicado na literatura.

Cabe ressaltar que, os coeficientes de absorção sonora publicados em tabelas da literatura são medidos em câmara reverberante, que considera as ondas sonoras provenientes igualmente de todas as direções (incidência sonora difusa). E no tubo de impedância, considera-se a propagação somente de ondas sonoras planas (incidência normal).

Tabela 15 – Comparação dos coeficientes de NRC (*Noise Reduction Coefficient*).

Autores	Coeficiente de absorção sonora do bloco de concreto não pintado							
	Literatura (bloco convencional não pintado)	Frequência em bandas de oitava [Hz]						
		125	250	500	1000	2000	4000	NRC
<i>Randall F. Barron</i>	Literatura (bloco convencional não pintado)	0,360	0,440	0,310	0,290	0,390	0,250	0,358
<i>Lawrence K. Wang et al.</i>								
<i>Marshall Long</i>								
<i>David Egan</i>								
<i>F. Alton Everest; Ken C. Pohlmann</i>								
<i>Tyler Adams</i>								
<i>Software SoundPlan</i>	<i>SoundPlan</i> (bloco convencional não pintado)	0,306	0,440	0,310	0,290	0,390	0,250	0,358
<i>Software SoundPlan</i>	<i>SoundPlan</i> (Norma RLS:1990 – valor único)							0,206
Pesquisa (Tese de doutorado)	Laboratório da UTFPR (bloco convencional não pintado)		0,237	0,281	0,482	0,373		0,343
Pesquisa (Tese de doutorado)	Laboratório da UTFPR (bloco de RCD não pintado)		0,269	0,225	0,298	0,212		0,251

Fonte: Autora (2019).

Figura 93 – Comparação do NRC entre o bloco de concreto convencional e o de RCD.

Fonte: Autora (2019).

Com base nas considerações experimentais, projetou-se no programa computacional a amostra de concreto de RCD para simulação de barreira acústica, com objetivo de testar o NRC (*Noise Reduction Coefficient*).

5.5 SIMULAÇÃO DE BARREIRA ACÚSTICA DE BLOCO DE CONCRETO DE RCD

Na presente seção, tomando-se como base a prática e o modelo computacional discutidos nas seções anteriores, estão apresentados os resultados das simulações das barreiras acústicas simples. Primeiramente, apresenta-se os valores da simulação realizada com o novo coeficiente de absorção (valor único $\alpha = 0,251$), que caracteriza o bloco de concreto de RCD. A Figura 94 apresenta as propriedades acústica inseridas na base de dados do *software*.

Figura 94 – Propriedades inseridas na base de dados do *SoundPlan* para simulação de barreira acústica de blocos de concreto de RCD.

Noise Barrier (Wall) Properties

Name: Barreira Acústica (Bloco de RCD)

Use for wall design

Base element

Height

Wall floats above ground

Wall height [m]: 3,00 Constant element height

Reflection properties

Single value Absorption spectrum

	Reflection loss [dB]	Absorption coeff.	Reflection coeff.
Left	1,3	0,251	0,749
Right	1,3	0,251	0,749

Statistics

Length [m]: 72,31 Area [m²]: 216,92

Total length [m]: 252,41 Total area [m²]: 757,22

OK Cancel Help

Fonte: Autora (2019).

Na sequência para fins de comparação, apresenta-se também, os dados da simulação realizada no capítulo quatro, a qual seguiu as propriedades acústicas definidas pelo método alemão RLS:1990, implementado no *software SoundPlan*, coeficiente de absorção (valor único $\alpha = 0,206$), conforme Figura 95.

Figura 95 – Propriedades da base de dados do *SoundPlan* para simulação de barreira acústica de concreto convencional.

Noise Barrier (Wall) Properties

Name: Barreira Acústica (Base de dados SoundPlan)

Use for wall design

Base element: Additional Elements

Height

Wall floats above ground:

Wall height [m]: 3,00 Constant element height:

Reflection properties

Single value Absorption spectrum

	Reflection loss [dB]	Absorption coeff.	Reflection coeff.
Left	1,0	0,206	0,794
Right	1,0	0,206	0,794

Statistics

Length [m]: 72,31 Area [m²]: 216,92

Total length [m]: 252,41 Total area [m²]: 757,22

OK Cancel Help

Fonte: Autora (2019).

O mapa de ruído de forma gráfica está ilustrado no APÊNDICE I. Constata-se que a atenuação de ruído para todos os pontos receptores, paralelos às vias de tráfego, foi satisfatória, em virtude de os mesmos apresentarem resultados de níveis sonoros abaixo do recomendado pela norma NBR 10151:2000 e pela Lei nº. 10625:2002 (legislação de Curitiba). Ambas estabelecem um limite máximo de 55 dB para a área em questão, no período diurno.

O Quadro 20 ilustra os valores do cálculo de atenuação com a inserção da barreira acústica, configurada com 3 metros de altura e coeficiente $\alpha = 0,251$. Para melhor apresentação dos valores, os mesmos foram exportados para o *Excel*. Os pontos receptores mais críticos (próximos às vias) apresentam: P1 = 50,4 dB, P2 = 51,5 dB, P3 = 43,9 dB, P4 = 51,5 dB, P5 = 49,3 dB, P6 = 49,4 dB, P14 = 47,9 dB, P15 = 50,5 dB e P16 = 52,3 dB. Estes mesmos pontos

receptores quando analisados *in loco* e calculados no programa sem a barreira estavam com ruído acima do recomendado pela norma técnica e legislação municipal.

Quadro 20 – Desempenho sonoro da barreira acústica de bloco de concreto de RCD.

Parâmetros de entrada							
Normas:							
Rodoviário:	RLS:1990						
Avaliação:	NBR 10151:2000 BRASIL	Descritor	L_{Aeq}	Ponderação	dB		
Dirige do lado esquerdo							
Cálculo:	Módulo <i>Wall Design</i> – Ponto único						
Título:	Barreira coeficiente 0,251 (bloco de RCD)						
Altura da barreira [m]:	3 [m]						
Name	Altura [m]	Térreo	Área	Nível	Nível limite	Atenuação [dB]	Nível atual
P1	952,21	GF	SCH	61,5	55	11,1	50,4
P2	952,21	GF	SCH	63,7	55	12,2	51,5
P3	951,3	GF	SCH	55,8	55	11,9	43,9
P4	950,73	GF	SCH	64,5	55	12,9	51,6
P5	950,68	GF	SCH	62,8	55	13,4	49,4
P6	950,98	GF	SCH	63,3	55	13,9	49,5
P7	950,68	GF	SCH	60,9	55	10,4	50,6
P8	950,68	GF	SCH	53,3	55	8,6	44,7
P9	950,68	GF	SCH	52,6	55	7,0	45,6
P10	950,02	GF	SCH	55,8	55	10,0	45,8
P11	951,23	GF	SCH	50,7	55	7,4	43,3
P12	951,23	GF	SCH	48,4	55	5,8	42,6
P13	951,23	GF	SCH	51,3	55	7,3	44,0
P14	954,83	GF	SCH	61,1	55	13,2	47,9
P15	954,74	GF	SCH	61,3	55	10,8	50,5
P16	956,5	GF	SCH	64,5	55	12,2	52,3
P17	955,35	GF	SCH	55,6	55	8,3	47,3
P18	955,35	GF	SCH	55,8	55	8,5	47,3
P19	956,2	GF	SCH	53,1	55	7,0	46,1
P20	955,46	GF	SCH	50,6	55	5,5	45,1
P21	955,35	GF	SCH	54,1	55	7,8	46,3
P22	955,35	GF	SCH	60,1	55	10,4	49,7

Fonte: Autora (2019).

Cabe ressaltar que, a atenuação ficou melhor compreendida nas edificações próximas às vias de tráfego de veículos (principais fontes sonoras), os demais edifícios estão intercalados. Neste caso, pode-se também destacar que os resultados obtidos variam com influência da distância da barreira até os pontos receptores, e, com a distância entre a fonte e a barreira, assim como o desnível existente na topografia do terreno. Dessa forma, comprovando a teoria de que a localização e altura da barreira é indispensável no cenário do ruído difratado.

5.6 COMPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO DE ATENUAÇÃO SONORA DA BARREIRA ACÚSTICA

Atribuiu-se para a simulação da barreira acústica o coeficiente de absorção sonora $\alpha = 0,251$ que caracteriza o bloco de concreto produzido com agregados 100% recicláveis (Resíduos da construção e demolição). E, o valor único $\alpha = 0,206$, que define o material de concreto, conforme exposto no manual do *SoundPlan*, indicado pelo método alemão RLS:1990, que define tal coeficiente para análise de ruído de tráfego, isso posto, quando não for necessário realizar cálculo espectral.

Embora, por não atingirem uma alta capacidade de absorção das ondas sonoras, por ter características de estrutura densa, os blocos de concretos de RCD, bem como o material convencional, obtiveram resultados satisfatórios em relação a atenuação sonora, principalmente, as edificações paralelas às vias de tráfego de veículos. Apresentando atenuação sonora em torno de 12 dB, conforme exposto no Quadro 21.

Quadro 21 – Comparação de atenuação sonora: Blocos de concreto de RCD versus convencional.

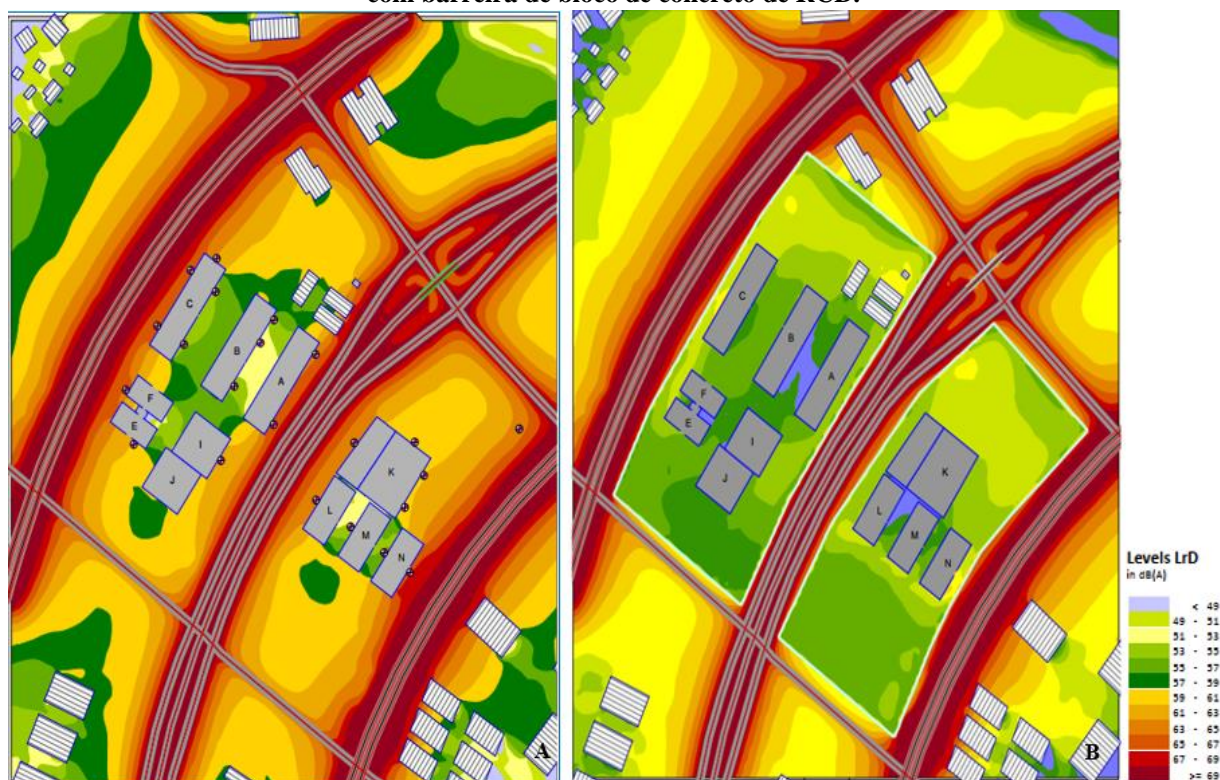
Comparação de atenuação sonora (dB)				
Pontos Receptores	Nível sonoro calculado sem barreira (L_{Aeq})	$\alpha = 0,251$ (Atenuação do bloco de RCD, em dB)	$\alpha = 0,206$ (Atenuação conforme Norma RLS:90, em dB)	Nível sonoro calculado com barreira (L_{Aeq})
P1	61,5	11,06	10,98	50,44
P2	63,7	12,18	12,10	51,52
P3	55,8	11,89	11,64	43,91
P4	64,5	12,94	12,94	51,56
P5	62,8	13,41	13,35	49,39
P6	63,3	13,85	13,84	49,45
P14	61,1	13,19	13,18	47,91
P15	61,3	10,76	10,63	50,54
P16	64,5	12,20	12,18	52,30

Fonte: Autora (2019).

Durante a análise do impacto sonoro, identificou-se que o ruído proveniente de tráfego de veículos é considerado a principal fonte sonora. Por consequência disso, os pontos receptores mais atingidos pelos níveis sonoros são os que estão próximos às vias de tráfego. Os cálculos realizados por meio da simulação mostram que, após a inserção das barreiras acústicas a área acadêmica encontra-se de acordo com a norma técnica NBR 10151:2000, e com a legislação municipal de Curitiba, Lei nº. 10625:2002, as quais estabelecem um limite máximo de 55 dB.

A Figura 96 apresenta o mapa acústico sem a barreira e com a implementação da barreira acústica. Realizou-se a simulação com o coeficiente de absorção sonora que caracteriza o bloco de concreto de RCD ($\alpha = 0,251$).

Figura 96 – Mapa acústico do câmpus universitário. A) Mapa acústico sem barreira. B) Mapa acústico com barreira de bloco de concreto de RCD.



Fonte: Autora (2019).

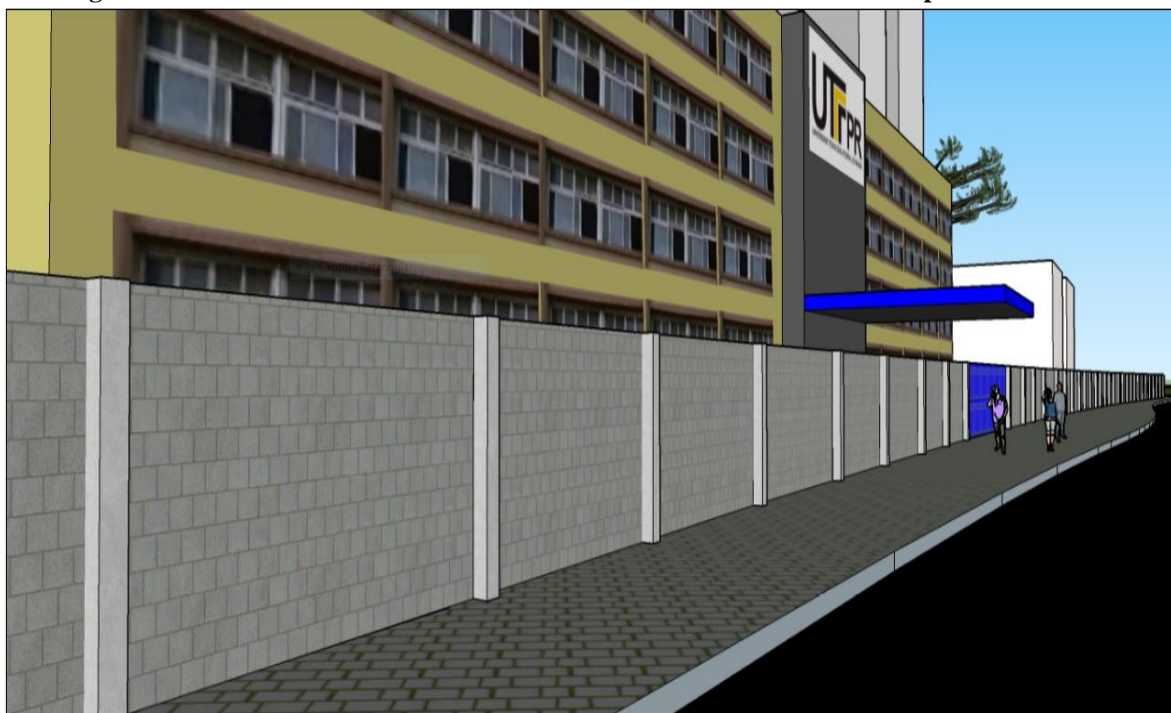
No contexto de atenuação de ruído, essencialmente os edifícios próximos às fontes sonoras (vias de tráfego de veículos), pode-se reconhecer com base nos resultados adquiridos em estudo de campo e por simulações computacionais, que a inserção de barreira acústica simples de resíduos da construção e demolição (RCD) é aconselhável para a redução do impacto sonoro. A análise comparativa dos resultados com e sem barreira comprova a eficiência do desempenho sonoro entre a fonte e o receptor.

Assim, os blocos de concreto de RCD para construção de barreiras acústicas pode tornar-se uma alternativa sustentável, seja atenuando o impacto sonoro e/ou o impacto ambiental. Haja vista que, no decorrer da elaboração desta tese, observou-se que os pesquisadores estão preocupados com o desenvolvimento sustentável, e visam por meio de seus trabalhos científicos disseminar informações ao mundo para conservar os recursos naturais da terra. As tendências atuais são orientadas a encontrar materiais sustentáveis alternativos para concreto, um exemplo, é a reciclagem de resíduos de subprodutos da construção civil, apresentada neste capítulo.

5.7 PERSPECTIVA DA BARREIRA ACÚSTICA EM TORNO DO CÂMPUS

As Figuras de 97 a 101, mostram a perspectiva da barreira acústica por meio da maquete elaborada no *SketchUp*.

Figura 97 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD frente ao câmpus universitário.



Fonte: Autora (2019).

Figura 98 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD na lateral do câmpus universitário.



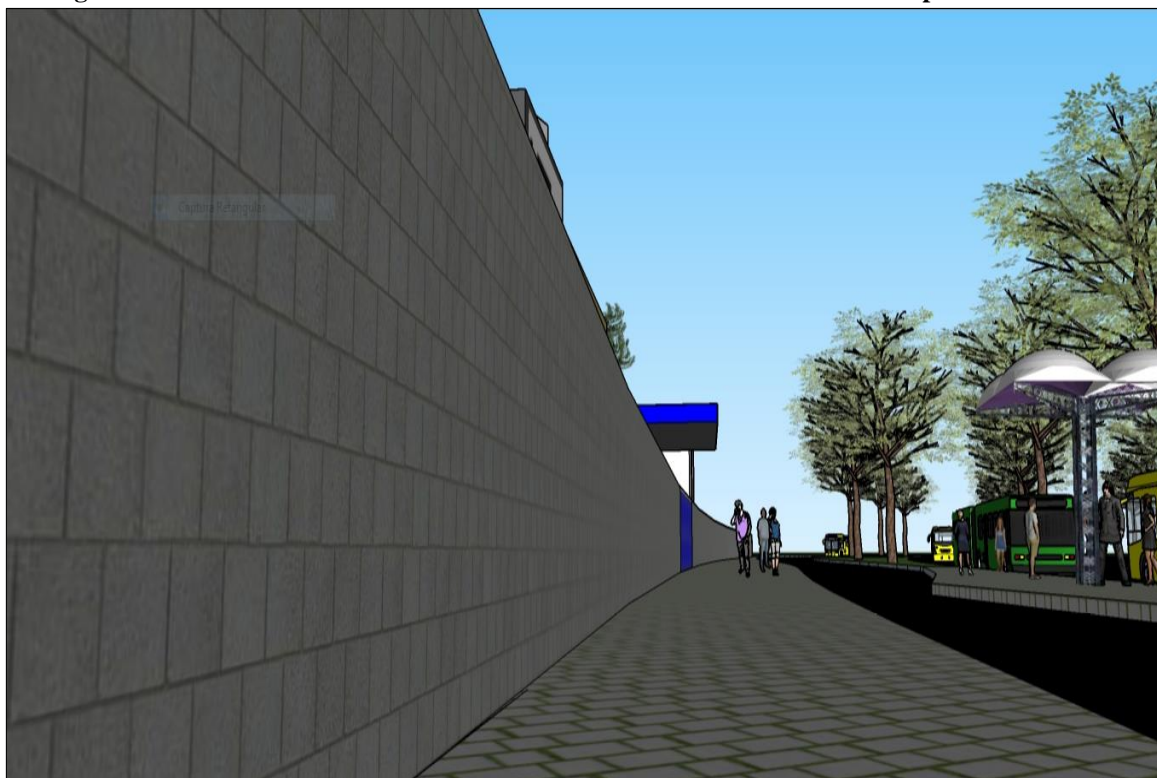
Fonte: Autora (2019).

Figura 99 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD das laterais do câmpus universitário.



Fonte: Autora (2019).

Figura 100 – Detalhe da barreira acústica de concreto de RCD frente ao câmpus universitário.



Fonte: Autora (2019).

Figura 101 – Detalhe da barreira acústica próximo à parada de ônibus.



Fonte: Autora (2019).

6 CONCLUSÕES

Na presente tese realizou-se um estudo de campo, exploratório e experimental sobre o controle de ruído em ambiente externo, com intuito de responder a seguinte questão de pesquisa que norteou o trabalho: “*Como atenuar o impacto sonoro em locais estratégicos, a fim de proteger áreas consideradas expostas a determinadas fontes de ruído, em específico, áreas universitárias próximas a vias de tráfego de veículos com fluxo contínuo*”? Para tanto, a investigação foi com base em uma busca sistemática de revisão bibliográfica, concepção de métodos e equipamentos para realizações de medições de níveis sonoros, assim como desenvolvimento de mapas de ruído e simulações computacionais de barreiras acústicas.

A modelagem computacional elaborada em *software* de predição acústica, *SoundPlan*, mostrou-se eficaz para realizar estudos sobre implementação de barreiras acústicas simples. Principalmente, quando o propósito é a atenuação de ruído proveniente de tráfego de veículos.

Observou-se que, o levantamento quantitativo dos níveis sonoros, e o mapa acústico consistem em uma ferramenta de apoio à gestão e às tomadas de decisões, para redução da poluição sonora nas cidades e em suas edificações, em atenção ao bem-estar e à saúde da população. Portanto, nesta tese, os modelos de simulações computacionais, tanto para mapas de ruído quanto simulações de barreiras acústicas, foram elaborados de forma a dispor de uma ferramenta evoluída para estudos de poluição sonora ambiental e controle de ruído, a fim de preservar zonas com níveis sonoros regulamentares.

Nesta pesquisa, notou-se que, a precisão dos cálculos para o mapa de ruído depende de diversos parâmetros de entrada, por exemplo, topografia do terreno, características e localizações das edificações (principais e auxiliares), tipos das vias de tráfego de veículos (largura, faixas de rolamento, direção do fluxo e superfície), canteiros centrais, fluxo de veículos (leves, pesados e velocidade média), e, dados meteorológicos (temperatura, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e direção do vento).

Sendo assim, nesta tese, utilizou-se o modelo matemático europeu para cálculo de ruído de tráfego, norma alemã *Richtlinien fur den Larmschutz an Straßen* (RLS:1990). Outros métodos, como por exemplo, a Diretiva Europeia 2002/49/CE”, Agência Portuguesa do Ambiente (2011), também serviram de base para desenvolvimento dos mapas acústicos. Tais métodos, podem contribuir para normas e pesquisas brasileiras sobre mapas de ruído e barreiras acústicas.

A escolha do modelo matemático, encontra-se na mesma linha de pesquisa de Calixto (2002), Sousa Quadros (2004), Nardi (2008) e Nogueira Pinto (2013), que utilizaram a norma

alemã RLS:1990, concluindo que o modelo é plausível para avaliação de níveis sonoros equivalentes, relacionados ao estudo de ruído de tráfego de veículos no perímetro urbano brasileiro. Quanto aos resultados dos níveis sonoros equivalentes calculados, esta pesquisa comprovou que o modelo matemático fornece valores suficientemente próximos aos níveis sonoros medidos, podendo assim, validar o mapa de ruído. Os resultados estão apresentados no capítulo quatro e cinco em forma de quadros e em forma gráfica, ou seja, mapas acústicos.

Na prática, realizou-se a avaliação de barreira acústica em um cenário real. Nesta etapa, observou-se que para a mitigação do ruído devem ser tomadas medidas necessárias para evitar potenciais impactos negativos à saúde humana. Quanto ao *design* e planejamento da barreira acústica é presumível que melhores resultados sejam projetados por engenheiros civis, arquitetos paisagistas ou especialistas em acústica, a fim de controlar o ruído de tráfego. Salientando que, os princípios básicos da teoria da barreira acústica são primordiais para que maiores benefícios possíveis possam ser obtidos, sem desperdícios.

A presente tese, também, expõe resultados de análise realizada por meio de experimento fatorial. Este processo teve o intuito de compreender como a variável resposta (atenuação sonora) pode ser afetada pelos fatores (coeficiente de absorção sonora e altura da barreira acústica). A contribuição dada pelo planejamento fatorial, é que não há interação entre os fatores, portanto, para este estudo com foco em barreira simples de bloco de concreto, o efeito principal para atenuação do ruído, ao ar livre, deve-se à diferença de altura da barreira acústica.

No decorrer do desenvolvimento desta pesquisa, foram produzidos blocos de concreto de resíduos da construção civil (RCD). Teve-se como principal parâmetro inserir o coeficiente de absorção sonora dos blocos de RCD na base de dados do *software SoundPlan* para simulação de barreira acústica. Para obtenção do coeficiente de absorção, realizou-se ensaio acústico em amostras de bloco de RCD, em um tubo de impedância, no laboratório de acústica do departamento de mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Com os dados dos coeficientes de absorção sonora, calculou-se o NRC (*Noise Reduction Coefficient*). Inseriu-se na biblioteca do programa novo material que caracteriza o bloco de concreto de resíduos da construção e demolição (RCD), sendo configurado com um $NRC = 0,251$. Para realizar comparação de atenuação sonora por meio de simulação, de barreira acústica, empregou-se, também, o material disponível na base de dados do *software SoundPlan*, com $NRC = 0,206$, que caracteriza material tipo concreto convencional.

Embora, por não apresentarem uma alta capacidade de absorção das ondas sonoras, possuindo características de estrutura densa, os blocos de concretos de RCD, bem como o

material convencional, apresentaram resultados satisfatórios em relação a atenuação sonora, principalmente, para edificações paralelas às vias de tráfego de veículos.

Para a área em estudo, os cálculos mostraram que, após a inserção das barreiras acústicas, os pontos receptores, principalmente os localizados próximos às vias de tráfego de veículos, estão todos de acordo com a norma técnica NBR 10151:2000 e com a legislação municipal de Curitiba, Lei nº. 10625:2002, as quais estabelecem um limite máximo de 55 dB para a área em questão. Pois, os pontos receptores mais críticos registraram reduções sonoras consideradas satisfatórias, sendo em P1 = 11 dB, P2 = 12 dB, P3 = 12 dB, P4 = 13 dB, P5 = 13 dB, P6 = 14 dB, P14 = 13 dB, P15 = 11 dB, e P16 = 12 dB.

Destaca-se nesta pesquisa que, além do controle da poluição sonora, os blocos de concreto com agregados 100% recicláveis (RCD), pode tornar-se uma prática para sustentabilidade, por conseguinte, contribuindo para reduzir a grande quantidade de resíduos da construção. Em geral, observou-se que os resíduos de RCD não só oferecem uma solução sustentável para reduzir a demanda dos locais de armazenamento, como também reduz o uso dos recursos naturais.

O mapeamento de ruído ambiental tem sido estudado por diversas pesquisas científicas, e algumas ações práticas consideráveis sobre o controle de ruído foram sugeridas para áreas urbanas. Entretanto, até o presente momento deste estudo, observou-se que não há inserção de barreiras acústicas de blocos de resíduos da construção implementadas entre a fonte principal de ruído (tráfego de veículos) e os limites externos de câmpus universitários, sobretudo, construídos em áreas abertas.

Portanto, no tocante ao âmbito geral desta pesquisa, conclui-se que os resultados obtidos, no que concerne ao objetivo proposto, ou seja, estudar uma solução sustentável para os problemas de resíduos e, principalmente, o controle de ruído de tráfego em um câmpus universitário, torna-se aceitável a inserção de barreira acústica.

A presente tese, proporciona uma base para desenvolver uma metodologia de avaliação e gestão de ruído ambiental, usando um *software* de cálculo de ruído para elaboração gráfica de mapas acústicos e simulações de barreiras. Sob o aspecto de contribuição com o meio ambiente, este estudo pode, tornar-se um ponto de partida para a reciclagem de resíduos de construção e demolição (RCD), com o propósito de ser utilizado na produção de barreiras acústicas.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, observou-se que o tema é uma questão de atribuição global, quanto aos métodos comuns de avaliação do ruído urbano e quanto às medidas a adotar no âmbito de planos de ação para redução do ruído ambiental. Por meio de

uma busca sistemática de revisão bibliográfica, notou-se que no Brasil há poucos estudos sobre a influência do tipo de material empregado no projeto de barreiras acústicas.

6.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de contribuir na continuação desta pesquisa, e tendo observado a relevância e abrangência que o tema representa, quanto ao controle de ruído e reaproveitamento de resíduos da construção e demolição (RCD), ficam descritas algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o coeficiente de absorção sonora dos blocos de concreto de RCD em câmara reverberante.
- Desenvolvimento de protótipo de barreira acústica de blocos de RCD, e avaliar o desempenho acústico com base em medição no local, ao ar livre.
- A barreira acústica como objeto deste estudo é de geometria simples, no entanto, estudos de novas formas de barreira, materiais e texturas podem ser investigadas.
- Investigar as características físicas do bloco de concreto de RCD, por exemplo, a porosidade e fator estrutural (tortuosidade), e comparar com o bloco convencional.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10151:2000. **Acústica – avaliação de ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade.** Rio de Janeiro.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15116:2004. **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6136:2016. **Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Requisitos.** Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016.** São Paulo: 2017.

AGÊNCIA PORTUGUESA DO AMBIENTE. (2011). **Directrizes para Elaboração de Mapas de Ruído.** Versão 3, 2011.

AMARILLA, R. S. D.; AVELAR, M.; RIBEIRO, R. S.; CATAI, R. E.; SOUSA, R. P.; MATOSKI, A. **Modelagem acústica: processo de avaliação de poluição sonora em um campus universitário na cidade de Curitiba – Paraná.** Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. Anais... Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2018.

ANDRADE, F. C. **Elaboração de um mapa acústico para a região central de Curitiba e principais vias de acesso ao centro da cidade.** 2012. (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.

ARENAS, C.; GALIANO, Y. L.; LEIVA, C.; VILCHES, L. F.; ARROYO, F.; VILLEGAS, R.; C. PEREIRA, C. F. *Development of a fly ash-based geopolymetric concrete with construction and demolition wastes as aggregates in acoustic barriers.* Construction and Building Materials, v. 134, p. 433-442, 2017.

ARENAS, C.; LEIVA, C.; VILCHES, L.F.; CIFUENTES, H. *Use of co-combustion bottom ash to design an acoustic absorbing material for highway noise barriers.* Waste Manage, v.33 p. 2316-2321, 2013.

ANSAY, S. S. **Estudo da poluição sonora através do mapa de ruído na implantação do novo Campus universitário da universidade Tecnológica Federal do Paraná.** 2013. Mestrado. (Mestre em Engenharia Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

BARBOSA, A. L. Z. **Estudo de barreiras para a atenuação do ruído aeronáutico no aeroporto de Congonhas em São Paulo.** 2015. Tese. (Doutor em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

BARRON, R. F. *Industrial Noise Control and Acoustics.* Published by Marcel Dekker, Inc Louisiana Tech University Ruston, Louisiana, U.S.A., 2003.

BIES, D. A.; HANSEN, C. H. *Engineering Noise Control: Theory and Practice.* University of Adelaide, Australia. Fourth edition, published in the Taylor & Francis e-Library, 2009.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle de ruído.** 2 edição - São Paulo: Blücher, 2011.

BLANCO, J. C.; FLINDELL, I. *Property prices in urban areas affected by road traffic noise.* Applied Acoustics, v.72, p. 133-141, 2011.

BODIN, T.; BJÖRK, J.; MATTISSON, K.; BOTTAL, M.; RITTNER, R.; GUSTAVSSON, P.; JAKOBSSON, K.; ÖSTERGREN, P. O.; ALBIN, M. *Road traffic noise, air pollution and myocardial infarction: a prospective cohort study*. *International Archives of Occupational and Environmental Health*. Volume 89, Issue 5, pp 793-802, 2016.

BOZKURT, T. S.; DEMIRKALE, S. Y. **Laboratory analyses and numerical simulation for sound absorption of plasters in historical buildings**. *Journal of Cultural Heritage* 36,103-117, 2019.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora 15 – Atividades e Operações Insalubres**. Manual de Legislação Atlas. 82ª Edição. São Paulo: Atlas, 2019.

BRAVO, M.; DE BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. *J. Clean. Prod.* 99, 59e74, 2015.

BRUNEAU, M. *Fundamentals of Acoustics*. First published in Great Britain and the United States by ISTE Ltd, in 2006.

BUSULO, W. F. **Construção de um tubo de impedâncias e teste através do método de função de transferência**. 2017. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Mecânica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CONNOLLY, D. M.; DOCKRELL, J. E.; SHIELD, M. B.; CONETTA, R.; COX, T. J. *Students' perceptions of school acoustics and the impact of noise on teaching and learning in secondary schools: Findings of a questionnaire survey*. *Energy Procedia*, v. 78, p. 3114-3119, 2015.

CALIXTO, A. **O ruído gerado pelo tráfego de veículos em “rodovias-grandes avenidas” situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba, analisado sob parâmetros acústicos objetivos e seu impacto ambiental**. 2002. Mestrado. (Mestre em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

CALZA, A. J. **Barreiras acústicas – ensaios laboratoriais e predição da atenuação por métodos numéricos e analíticos**. 1999. Mestrado. (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina.

COWAN, J. P. *The effects of sound on people*. Edition first published 2016, Wiley series in Acoustics, noise and Vibration series list, John Wiley and Sons, Ltd, 2016.

CRESWELL, J. W. **Projeto de Pesquisa: Métodos Qualitativo, Quantitativo e Misto**. 3 ed. Porto Alegre: Artmed, 2010.

CURITIBA. Prefeitura Municipal de Curitiba Secretaria Municipal do Meio Ambiente. LEI n.º 10.625. Publicada no D.O..M em 19/12/2002.

DIRECTIVA 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de junho de 2002. **Relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente**.

DUARTE, G.; BRAVO, M.; BRITO, J.; NOBRE, J. *Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete*. *Construction and Building Materials*, 210, 696-708, 2019.

EGAN, D. *Architectural acoustics*. Reprint. Originally published: New York: McGraw-Hill. Copyright, 2007.

EL-HASSAN, H.; KIANMEHR, P.; ZOUAOU, S. *Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag*. *Construction and Building Materials*, 212,164-175, 2019.

ERMANN, M. *Architectural Acoustics illustrated*. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2015.

ESPINOZA, F. *Wave Motion as Inquiry: The Physics and Applications of Light and Sound*. Hofstra University and Suny College at Old Westbury, Long Island, NY, USA. Springer International Publishing Switzerland, 2017.

EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *Master Handbook of Acoustics*. Fifth Edition, by The McGraw-Hill Companies, Inc. 2009.

EUROPEAN COMMISSION WORKING GROUP ASSESSMENT OF EXPOSURE TO NOISE (WG-AEN), 2007. *Position Paper, Good Practice Guide for Strategic Noise Mapping and the Production of Associated Data on Noise Exposure*. Version 2, 13th August 2007.

EUROPEAN UNION, 2002. DIRECTIVE 2002/49/EC *Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise*. Official Journal of the European Communities, No. L 189.

FERRANDIZ-MAS, V., GARCIA-ALCOCEL, E. *Physical and mechanical characterization of Portland cement mortars made with expanded polystyrene particles addition (EPS)*. 2012. Mater. Construcción 62, 547-566.

FUJIWAR, K.; ANDO, Y.; MAEKAWA, Z. *Noise Control by Barrier – Part 1: Noise Reduction by a Thick Barrier*. Applied acoustics, 1977.

GARG, N.; MAJI, S. *A critical review of principal traffic noise models: Strategies and implications*. Environmental Impact Assessment Review, v. 46, p. 68-81, 2014.

GIL, A. C. *Como Elaborar Projetos de Pesquisa*. 4. ed. - São Paulo: Atlas, 2009.

GHIZDAVET, Z., STEFAN, B.M., NASTAC, D., VASILE, O., BRATU, M. *Sound absorbing materials made by embedding crumb rubber waste in a concrete matrix*. Construct Build. Mater. 124, 755-763, 2016.

GONÇALVES, R. P. R. *Atenuação Sonora de Barreiras Acústicas*. 2014. Dissertação. (Mestre em Engenharia do Ambiente na Especialidade de Território e Gestão do Ambiente) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade de Coimbra.

GONZÁLEZ, A. E. *Mapas acústicos: Mucho más que una cartografía coloreada*. Sociedad de Ingeniería de Audio. Congreso Latinoamericano de la AES, 2011.

GOZALO, G. R.; MORILLAS, J. M. B.; CARMONA, J. T.; GONZÁLEZ, D. M.; MORAGA, P. A.; ESCOBAR, V. G.; GÓMEZ, R. V.; SIERRA, J. A.; GAJARDO, C. P. *Study on the relation between urban planning and noise level*. Applied Acoustics, v. 111, p. 143-147, 2016.

HAN, X.; HUANG, X.; LIANG, H.; MA, S.; GONG, J. *Analysis of the relationships between environmental noise and urban morphology*. Environmental Pollution, v. 233, p. 755-763, 2018.

HANSEN, C. H.; DOOLAN, C. J.; HANSEN, K. L. *Wind Farm Noise: Measurement, Assessment and Control*. Edition first published by John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2017.

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*. Departamento de transportes de California, 2013.

- HONG, J. Y.; JEON, J. Y. *The effects of audio–visual factors on perceptions of environmental noise barrier performance*. Landscape and Urban Planning, v. 125 p. 28-37, 2014.
- IBARRA, D.; MENDOZA, R. R.; LÓPEZ, E. *Noise emission from alternative fuel vehicles: Study case*. Applied Acoustics, v.118, p. 58-65, 2017.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (2015). **Arranjos populacionais e concentrações urbanas do Brasil**. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/apps/arranjos_populacionais/2015/pdf/publicacao.pdf> Acesso em: 27.08.2018.
- IIDA, I. **Ergonomia: projeto e produção**. 2ª edição, rev. e ampli., São Paulo: Edgard Blucher, 2005.
- JACOBSEN, F.; JUHL, P. M. *Fundamentals of General Linear Acoustics*. Edition first published by John Wiley & Sons Ltd. United Kingdom, 2013.
- JOLIBOIS, A.; DEFRANCE, J.; KORENEFF, H.; JEAN, P.; DUHAMEL, D.; SPARROW, V. W. *In situ measurement of the acoustic performance of a full scale tramway low height noise barrier prototype*. Applied Acoustics, v. 94 p. 57-68, 2015.
- JOYNT, J. L. R.; KANG, J. *The influence of preconceptions on perceived sound reduction by environmental noise barriers*. Science of the Total Environment, v. 408, p. 4368-4375, 2010.
- KEMPEN, E. V.; BABISCH, W. *The quantitative relationship between road traffic noise and hypertension: a meta-analysis*. Journal of Hypertension, volume 30, number 6, p. 1075-1086, 2012.
- KHAN, J.; KETZEL, M.; KAKOSIMOS, K.; SØRENSEN, M.; JENSEN, S. S. *Road traffic air and noise pollution exposure assessment – A review of tools and techniques*. Science of the Total Environment, 634,661- 676, 2018.
- KIM, Y, H. *Sound Propagation an Impedance Based Approach*. John Wiley & Sons, Asia, 2010.
- KING, E. A.; MURPHY, E. *Environmental noise – ‘Forgotten’ or ‘Ignored’ pollutant?* Applied Acoustics, v. 112, p. 211-215, 2016.
- KOTZEN, B; ENGLISH, C. *Environmental Noise Barriers: A guide to their acoustic and visual design*. 2 ed. Published by Taylor & Francis 2 Park Square, Milton Park, Abingdon, Oxon OX14 4RN, 2009.
- KOUSSA, F.; DEFRANCE, J.; JEAN, P.; P. BENON, P. B. *Acoustic performance of gabions noise barriers: numerical and experimental approaches*. Applied Acoustics 74,189- 197, 2013.
- KURZE, U. J.; ANDERSON, G. S. *Sound Attenuation by Barriers*. Bolt Beranekand Newman Inc., Cambridge, Mass, 1971.
- LAGONIGRO, R.; MARTORI, J. C.; APPARICIO, P. *Environmental noise inequity in the city of Barcelona*. Transportation Research Part D, v. 63, p. 309-319, 2018.
- Lee, S. W; Chang, S. I.; Park, Y. M. *Utilizing noise mapping for environmental impact assessment in a downtown redevelopment area of Seoul, Korea*. Applied Acoustics, Volume 69, Issue 8, Pages 704-714, 2008.
- LICITRA, G. *Noise mapping in the EU: Models and procedures*. Taylor and Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, 2013.

- LISOT, A. **Modelo em escala reduzida ao ar livre como ferramenta de validação de simulação computacional de barreiras acústicas**. 2013. Doutorado. (Doutora em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp.
- LONG, M. *Architectural acoustics*. Elsevier Academic Press, USA, 2006.
- LOUPA, G.; KATIKARIDIS A.; KARALI, D.; RAPSOMANIKIS, S. **Mapping the noise in a Greek general hospital**. *Science of the Total Environment*, v. 646, p. 923-929, 2019.
- MAEKAWA, Z. *Noise Reduction by Screens*. AppliedAcoustics-ElsevierPublishing Company Ltd., England-Printed in Great Britain, 1968.
- MAEKAWA, Z. *Noise Reduction by Distance from Sources of Various Shapes*. Applied acoustics, 1970.
- MANVELL, D.; BANDA, E. H. V. *Good practice in the use of noise mapping software*. *Applied Acoustics* v. 72, p. 527-533, 2011.
- MARCONI, M. A.; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- MARIE, I.; QUIASRAWI, H. 2012. *Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates*. *J. Clean. Prod.* 37, 243-248, 2012.
- MATEUS, M. L. O. DE S. **A Influência dos Parâmetros de Amostragem na Incerteza das Medições de Ruído Ambiental**. 2014. Doutorado. (Doutor em Engenharia Mecânica). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- MEDINA, M.G. O.; MONTAÑO, A. F. *Urban noise and transport as a strategy of environmental quality*. 2nd Pan-American and Iberian Meeting on Acoustics, 160th ASA meeting, 7^o Congress FIA, 17^o Congress IMA, ISSN: 0001-4966, Cancún, México, November 2010.
- MONARCA, N. A. B.; SUÁREZ, E.; ARENAS, J. P. *Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile*. *Science of the Total Environment* v. 550, p. 439-448, 2016.
- MORAIS, L. R. **Estudo de Barreiras Acústicas no Controle do Ruído Aeroportuário**. 2008. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. Eighth Edition. John Wiley & Sons, Inc, 2013.
- MUDULI, R; MUKHARJEE, B. B. *Effect of incorporation of metakaolin and recycled coarse aggregate on properties of concrete*. *Journal of Cleaner Production* 209, 398-414, 2019.
- NAGEM., M. P. **Mapeamento e análise do ruído ambiental: diretrizes e metodologia**. 2004. Mestrado. (Mestre em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas.
- NARDI, A. S. L. V. **Mapeamento sonoro em ambiente urbano estudo de caso: área central de Florianópolis**. 2008. Mestrado. (Mestre em arquitetura e urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- NIEMEYER, M. L.; SLAMA, J. G. **O Ruído e a Cidade: elementos de ruído urbano**. In: V. del Rio (org.), *Arquitetura, Pesquisa e Projeto* (1^a ed., Vol. 1, p. 75-89). São Paulo: PROARQ, 1998.
- NOGUEIRA PINTO, D. **Mapeamento acústico como ferramenta para predição de ruído urbano na área de influência do estádio Arena das Dunas, Natal/RN**. 2013. Dissertação.

(Mestre na área de concentração em Projetos, Morfologia e Conforto do Ambiente Construído) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

OANCEA, I.; BUJOREANU, C.; BUDESCU, M.; BENCHEA, M.; GRADINARU, C. M. **Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements.** *Journal of Cleaner Production* 203, 301-312, 2018.

OLTEAN-DUMBRAVA, C., MIAH, A. **Assessment and relative sustainability of common types of roadside noise barriers.** *J. Clean. Prod.* 135, 919-931, 2016.

PACHECO, M. G. L.; FERNÁNDEZ, L. P. S.; LOZANO, H. M.; PÉREZ, L. A. S. **Predominant environmental noise classification over sound mixing based on source-specific dictionary.** *Applied Acoustics* v. 112, p. 171-180, 2016.

PARZYCH, D. **Handling of Barriers in ISO 9613-2. NOISE-CON 2004.** Baltimore, Maryland, 2004.

PAZOS, D. F. P. **Caracterização da reflexão sonora de barreiras acústicas com superfícies corrugadas periódicas.** 2015. Tese. (Doutor em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

PENG, J.; ZHANG, H.; WANG, D. **Measurement and analysis of teaching and background noise level in classrooms of Chinese elementary schools.** *Applied Acoustics*, v.131, p. 1-4, 2018.

PERECIN, D; CARGNELUTTI FILHO. **Efeitos por Comparações e por Experimento em Interações de Experimentos Fatoriais.** *Ciênc. agrotec.*, Lavras, v. 32, n. 1, p. 68-72, jan./fev., 2008.

PREZELJ, J.; MUROVEC, J. **Traffic noise modelling and measurement: Inter-laboratory comparison.** *Applied Acoustics*, v. 127, p. 160-168, 2017.

PORTELA, A. S.; GRANQVIST, S.; TERNSTRÖM, S.; SÖDERSTEN, M. **Vocal Behavior in Environmental Noise: Comparisons Between Work and Leisure Conditions in Women With Work-related Voice Disorders and Matched Controls.** *Vocal Behavior in Environmental Noise*, v. 32, n. 1, p. 126-231 and 26-38, 2018.

RODRIGUES, F. **Metodologia para investigação de relação entre ruído de tráfego e condições operacionais do fluxo em centros urbanos.** 2010. Tese. (Doutor em Engenharia de Transporte) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

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

SANTOS, K. de A. **Proposta de um software para apoio ao aprendizado do planejamento de experimento.** 2017. Dissertação. (Mestre em Engenharia de Produção). Universidade Estadual Paulista.

SIANO, D. **Noise Control, Reduction and Cancellation Solutions in Engineering.** Published by InTech. Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 2012.

SILVA, L. T.; OLIVEIRA, I. S.; SILVA, J. F. **The impact of urban noise on primary schools. Perceptive evaluation and objective assessment.** *Applied Acoustics*, v. 106, p. 2-9, 2016.

SOUNDPLAN GmbH. **User's manual 7.4.** 2018.

SOUSA, D. S. **Instrumentos de gestão de poluição sonora para a sustentabilidade das cidades Brasileiras.** 2004. Tese. (Doutor em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

SOUSA QUADROS, F. **Avaliação do ruído ambiental gerado por veículo de utilidade pública estudo de caso: caminhão de coleta de resíduos domiciliar.** 2004. Dissertação. (Mestre em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

SOUSA, R. P. **Sustentabilidade e análise acústica: produção de blocos de concreto com utilização de resíduos da construção civil.** 2019. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Civil). Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

STORCK, L.; GARCIA, D. C.; LOPES, S. J.; ESTEFANEL, V. **Experimentação vegetal.** 2. ed. Santa Maria: UFSM, 2006.

TERASHIMA, F. J. H. **Caracterização das propriedades acústicas de materiais absorventes de pequenas espessuras com três métodos de avaliação.** 2016. Mestrado. (Mestre em Engenharia Mecânica). Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

VIANNA, K. M. P. **Poluição sonora no Município de São Paulo: avaliação do ruído e o impacto da exposição na saúde da população.** 2014. Tese. (Doutor em Ciências) – Universidade de São Paulo, Faculdade de saúde pública.

VOGIATZIS, K.; REMY, N. *From environmental noise abatement to soundscape creation through strategic noise mapping in medium urban agglomerations in South Europe.* Science of the Total Environment, v. 482-483, p. 420-431, 2014.

VUYLSTEKE, Xavier. *Development of a reference method based on the fast multipole boundary element method for sound propagation problems in urban environments: formalism, optimizations and applications.* 2014. Thèse de doctorat. Université Paris – EST. École doctorale Sciences, Ingénierie et Environnement.

WANG, L. K.; PEREIRA, N. C.; HUNG, Y. T.; *Handbook of Environmental Engineering: Advanced Air and Noise Pollution Control.* Volume 2. Humana Press Inc. Totowa, New Jersey, 2005.

WHO. **WORLD HEALTH ORGANIZATION.** Disponível em: <http://www.who.int/topics/urban_health/en/>. Acesso em: 07.06.2019.

ZANNIN, P. H. T.; SANT'ANA, D. Q. *Noise mapping at different stages of a freeway redevelopment project – A case study in Brazil.* Applied Acoustics, v. 72, p. 479-486, 2011.

ZANNIN, P. H. T.; ENGEL, M. S.; FIEDLER, P. E. K.; BUNN, F. *Characterization of environmental noise based on noise measurements, noise mapping and interviews: A case study at a university campus in Brazil.* Cities, v. 31, p.317-327, 2013.

APÊNDICES

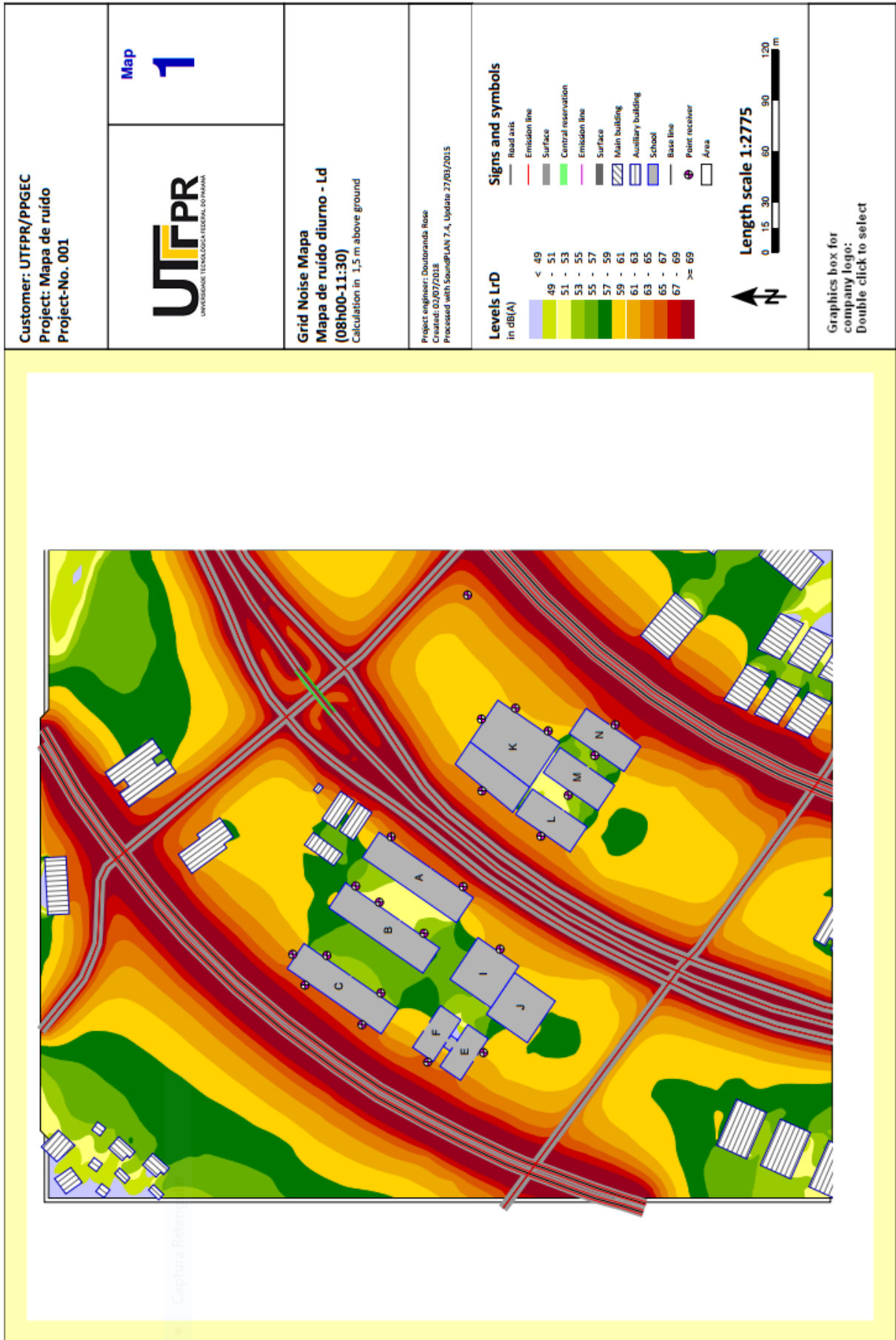
APÊNDICE A

Tabela 16 – Mapeamento de ruído ambiental em torno do câmpus universitário.

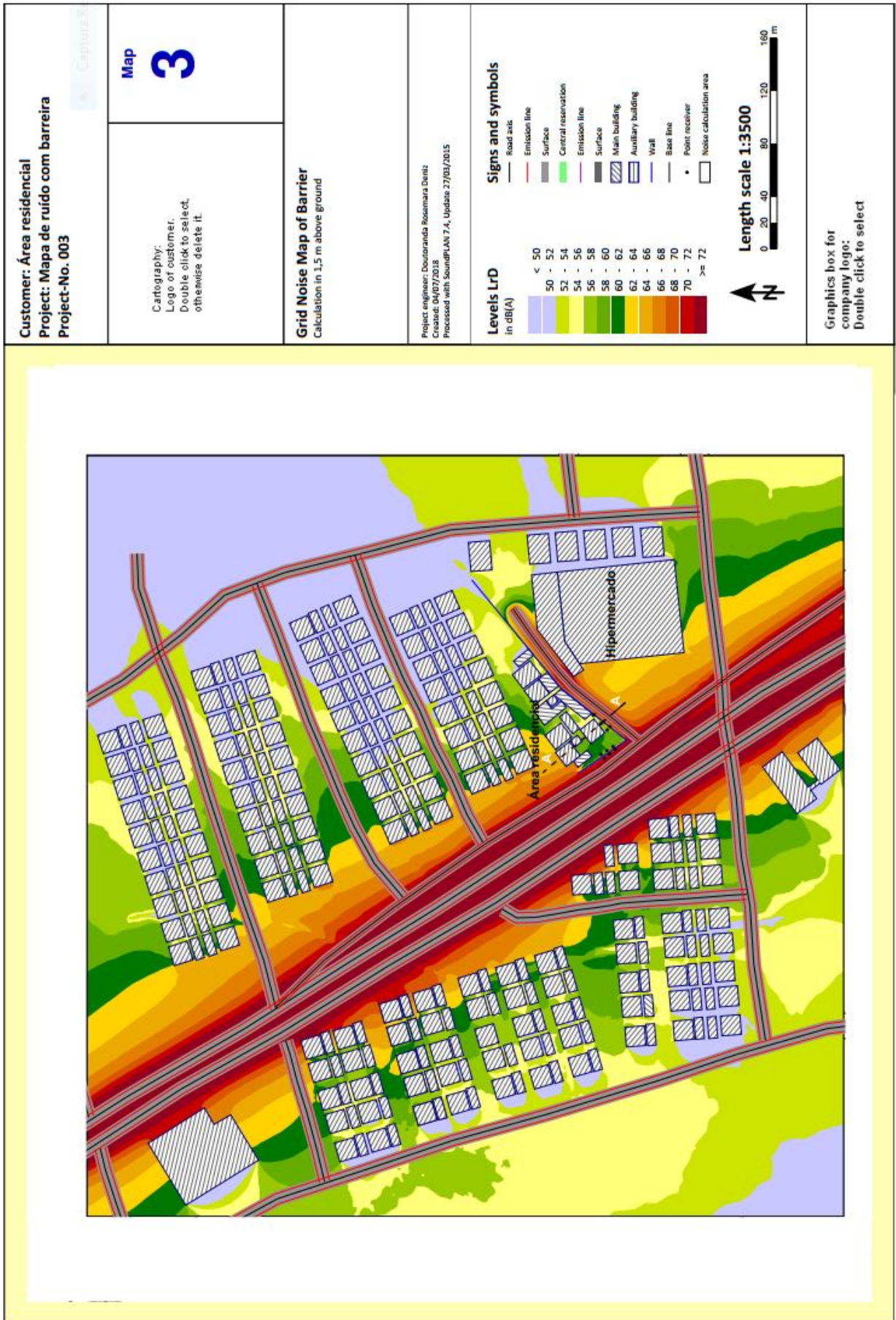
Dados coletados				Intituto Nacional de Meteorologia INMET Estação A807 - Curitiba (Dados do início e término das medições)			
Data	Pontos	L_{Aeq} [dB]	Hora	Temperatura (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Umidade relativa do ar (%)	Pressão atmosférica (hPa)
20/04/2017	P1	61	08h00	19/21	1	68/65	913/911
	P2	64	08h20				
	P3	56	09h40				
25/04/2017	P4	62	08h00	16/18	2	84/80	910 / 912
	P5	63	08h20				
	P6	65	08h40				
	P7	62	09h00				
	P8	55	09h20				
	P9	52	09h40				
	P10	56	10h00				
	P11	59	10h20				
	P12	66	10h40				
	P13	57	11h00				
03/05/2017	P14	61	08h00	15/16	1	92/82	917 /918
	P15	64	08h20				
	P16	66	08h40				
	P17	56	09h00				
	P18	56	09h20				
	P19	53	09h40				
	P20	51	10h00				
	P21	54	10h20				
P22	61	10h40					

Fonte: Autora (2018).

APÊNDICE B - Mapa de ruído sem barreira acústica do câmpus universitário.



APÊNDICE C - Mapa de ruído com barreira acústica de um cenário real.



APÊNDICE D - Mapa de ruído com barreira acústica de 3 m de altura para o câmpus.



APÊNDICE E – Resultado da simulação da barreira para experimento fatorial.

Tabela 17 – Resultado da simulação das barreiras acústicas de 2 e 4 metros de altura.

Ponto	Sem barreira	Altura 2 metros		Altura 4 metros	
	<i>L</i> Aeq, dB	Coef. 0,2	Coef. 0,5	Coef. 0,2	Coef. 0,5
P1	61,50	54,76	54,08	49,29	48,22
P2	63,70	56,75	55,99	49,61	48,69
P3	55,80	47,98	47,07	42,42	41,48
P4	64,50	54,44	54,43	49,52	48,84
P5	62,80	51,29	51,1	48,26	47,62
P6	63,30	50,55	50,54	47,79	47,75
P14	61,10	49,5	49,47	46,33	46,27
P15	61,30	54,36	53,75	48,92	48,04
P16	64,50	57,98	57,9	49,28	48,07

Fonte: Autora (2019).

Tabela 18 – Resultado de atenuação sonora da barreira com 2 metros de altura.

Ponto	Sem barreira	Altura 2 metros		Atenuação	
	<i>L</i> Aeq, dB	Coef. 0,2	Coef. 0,5	Coef. 0,2	Coef. 0,5
P1	61,50	54,76	54,08	6,74	7,42
P2	63,70	56,75	55,99	6,95	7,71
P3	55,80	47,98	47,07	7,82	8,73
P4	64,50	54,44	54,43	10,06	10,07
P5	62,80	51,29	51,1	11,51	11,70
P6	63,30	50,55	50,54	12,75	12,76
P14	61,10	49,5	49,47	11,60	11,63
P15	61,30	54,36	53,75	6,94	7,55
P16	64,50	57,98	57,9	6,52	6,60

Fonte: Autora (2019).

Tabela 19 – Resultado de atenuação sonora da barreira com 4 metros de altura.

Ponto	Sem barreira	Altura 4 metros		Atenuação	
	<i>L</i> Aeq, dB	Coef. 0,2	Coef. 0,5	Coef. 0,2	Coef. 0,5
P1	61,50	49,29	48,22	12,21	13,28
P2	63,70	49,61	48,69	14,09	15,01
P3	55,80	42,42	41,48	13,38	14,32
P4	64,50	49,52	48,84	14,98	15,66
P5	62,80	48,26	47,62	14,54	15,18
P6	63,30	47,79	47,75	15,51	15,55
P14	61,10	46,33	46,27	14,77	14,83
P15	61,30	48,92	48,04	12,38	13,26
P16	64,50	49,28	48,07	15,22	16,43

Fonte: Autora (2019).

APÊNDICE F – Características das amostras do bloco de concreto convencional.

Quadro 22 – Características das amostras do bloco de concreto convencional para ensaio acústico.

Dados das amostras do bloco de concreto convencional							
Amostra	Diâmetro [mm]	Diâmetro [m]	Altura [mm]	Altura [m]	Massa [g]	Massa [kg]	Densidade [kg/m ³]
1	59,0	0,06	17,70	0,02	87,0	0,087	1819,695
2	58,6		17,65				
3	58,6		17,65				
4	58,8	0,06	17,10	0,02	86,0	0,086	1932,865
5	59,0		15,95				
6	58,8		16,05				
7	58,7	0,06	16,10	0,02	80,0	0,080	1805,569
8	59,0		16,10				
9	58,8		16,75				
10	58,9	0,06	16,20	0,02	84,0	0,084	1901,266
11	58,9		16,20				
12	58,8		16,30				
13	58,8	0,06	16,80	0,02	86,0	0,086	1903,719
14	58,7		16,45				
15	58,8		16,80				
16	58,9	0,06	16,35	0,02	86,0	0,086	1925,725
17	58,7		16,90				
18	58,7		16,20				
19	59,3	0,06	16,85	0,02	86,0	0,086	1871,255
20	59,0		16,60				
Média	58,8	0,06	16,64	0,02	85,0	0,085	1880,013

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

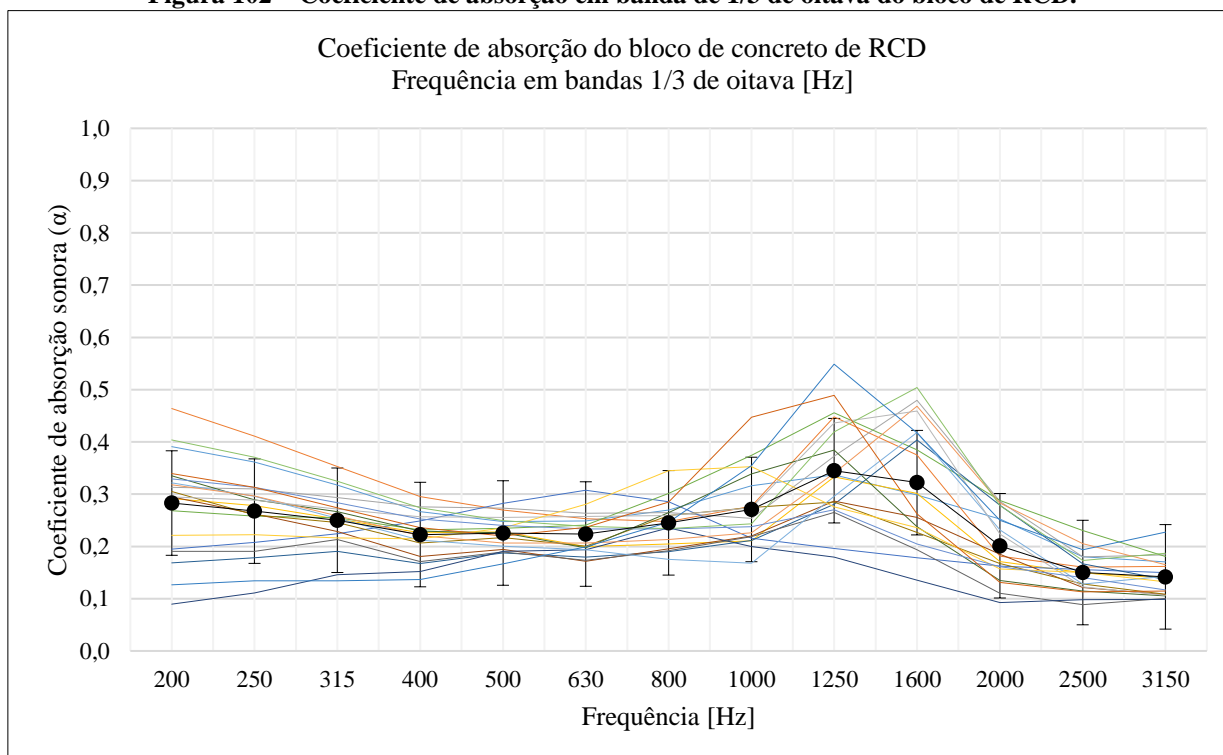
APÊNDICE G – Coeficiente de absorção em bandas de 1/3 de oitava (bloco de RCD).

Quadro 23 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de RCD.

Amostras de blocos de RCD													
Coeficiente de absorção sonora em bandas de terço de oitava													
Frequência (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Amostra 1	0,39	0,36	0,32	0,27	0,25	0,25	0,27	0,32	0,34	0,30	0,25	0,18	0,17
Amostra 2	0,46	0,41	0,35	0,30	0,27	0,25	0,25	0,28	0,45	0,38	0,18	0,16	0,16
Amostra 3	0,31	0,31	0,29	0,28	0,27	0,26	0,26	0,25	0,37	0,48	0,29	0,18	0,18
Amostra 4	0,29	0,28	0,25	0,23	0,23	0,20	0,20	0,21	0,33	0,30	0,17	0,15	0,14
Amostra 5	0,19	0,21	0,22	0,25	0,28	0,31	0,29	0,22	0,20	0,18	0,16	0,16	0,15
Amostra 6	0,27	0,26	0,25	0,23	0,23	0,24	0,30	0,37	0,46	0,38	0,29	0,23	0,18
Amostra 7	0,17	0,18	0,19	0,17	0,19	0,18	0,19	0,21	0,28	0,40	0,28	0,17	0,14
Amostra 8	0,29	0,26	0,23	0,18	0,19	0,17	0,20	0,22	0,29	0,26	0,19	0,12	0,11
Amostra 9	0,19	0,19	0,21	0,17	0,19	0,17	0,19	0,22	0,27	0,19	0,11	0,09	0,10
Amostra 10	0,31	0,26	0,25	0,21	0,22	0,20	0,26	0,27	0,28	0,23	0,17	0,13	0,11
Amostra 11	0,09	0,11	0,15	0,15	0,19	0,19	0,24	0,20	0,18	0,14	0,09	0,10	0,10
Amostra 12	0,34	0,29	0,27	0,23	0,23	0,20	0,26	0,34	0,38	0,24	0,14	0,11	0,11
Amostra 13	0,32	0,30	0,25	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,30	0,42	0,23	0,13	0,14
Amostra 14	0,32	0,30	0,26	0,22	0,21	0,21	0,21	0,23	0,34	0,47	0,28	0,21	0,17
Amostra 15	0,29	0,29	0,27	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,44	0,46	0,22	0,12	0,11
Amostra 16	0,22	0,22	0,22	0,21	0,24	0,28	0,35	0,35	0,28	0,24	0,16	0,15	0,13
Amostra 17	0,33	0,31	0,28	0,25	0,24	0,23	0,23	0,24	0,27	0,20	0,16	0,14	0,12
Amostra 18	0,40	0,37	0,32	0,27	0,25	0,24	0,23	0,24	0,42	0,50	0,28	0,17	0,19
Amostra 19	0,13	0,13	0,13	0,14	0,17	0,20	0,25	0,35	0,55	0,42	0,25	0,19	0,23
Amostra 20	0,34	0,31	0,27	0,24	0,22	0,24	0,28	0,45	0,49	0,26	0,13	0,11	0,11
Média da frequência (Hz)	0,28	0,27	0,25	0,22	0,23	0,22	0,25	0,27	0,34	0,32	0,20	0,15	0,14
Desvio padrão por frequência (Hz)	0,09	0,08	0,05	0,04	0,03	0,04	0,04	0,07	0,10	0,11	0,06	0,04	0,04

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Figura 102 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de RCD.



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

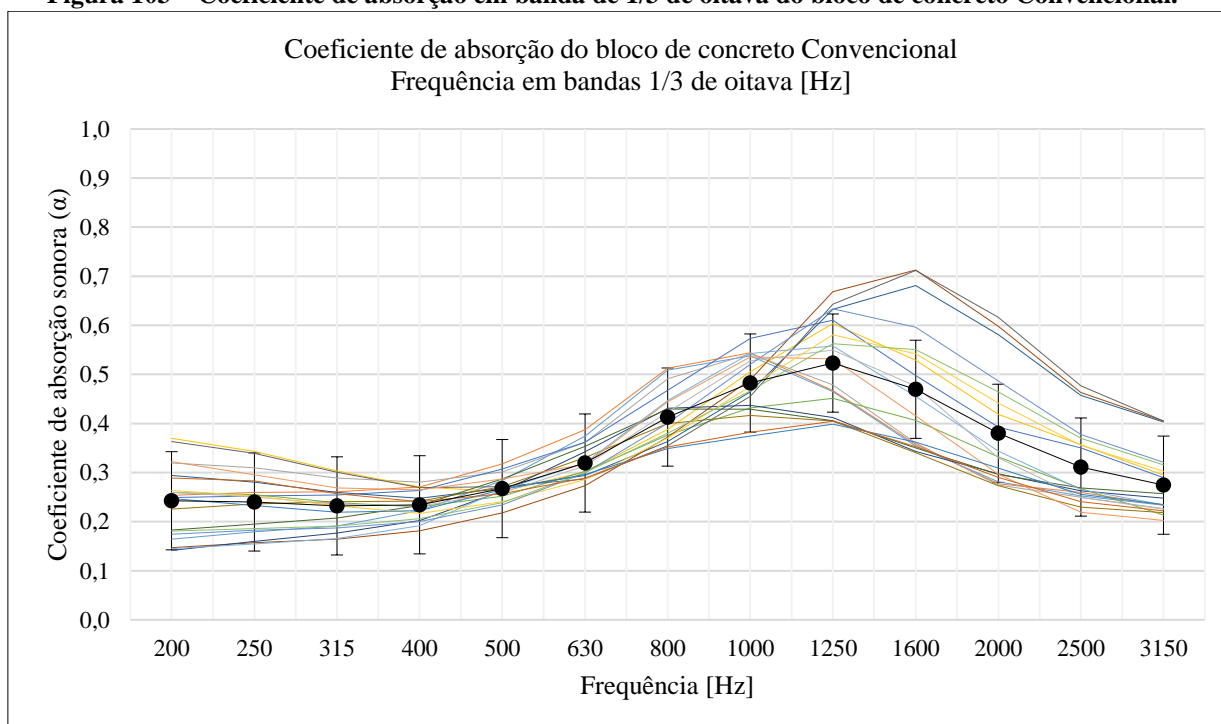
APÊNDICE H – Coeficiente de absorção em bandas de 1/3 de oitava (bloco Convencional).

Quadro 24 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de concreto Convencional.

Amostras de bloco de concreto Convencional													
Coeficiente de absorção sonora em bandas de terço de oitava													
Frequência (Hz)	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150
Amostra 1	0,16	0,18	0,19	0,22	0,28	0,37	0,51	0,54	0,47	0,35	0,28	0,25	0,23
Amostra 2	0,25	0,26	0,26	0,27	0,32	0,39	0,51	0,54	0,47	0,36	0,28	0,26	0,23
Amostra 3	0,32	0,31	0,29	0,28	0,30	0,36	0,49	0,54	0,48	0,36	0,27	0,25	0,23
Amostra 4	0,37	0,34	0,30	0,27	0,26	0,30	0,39	0,51	0,60	0,53	0,42	0,36	0,29
Amostra 5	0,25	0,25	0,25	0,26	0,31	0,36	0,47	0,57	0,61	0,50	0,39	0,35	0,29
Amostra 6	0,26	0,26	0,24	0,23	0,25	0,30	0,38	0,43	0,45	0,41	0,33	0,27	0,21
Amostra 7	0,29	0,28	0,26	0,25	0,27	0,29	0,36	0,46	0,63	0,68	0,58	0,46	0,40
Amostra 8	0,15	0,16	0,16	0,18	0,22	0,27	0,37	0,49	0,67	0,71	0,60	0,46	0,41
Amostra 9	0,36	0,34	0,30	0,27	0,27	0,29	0,35	0,46	0,64	0,71	0,62	0,48	0,40
Amostra 10	0,23	0,24	0,24	0,24	0,27	0,33	0,40	0,42	0,41	0,34	0,27	0,23	0,22
Amostra 11	0,14	0,16	0,18	0,20	0,26	0,34	0,43	0,44	0,41	0,34	0,30	0,26	0,25
Amostra 12	0,18	0,19	0,21	0,23	0,29	0,35	0,43	0,43	0,41	0,35	0,30	0,27	0,26
Amostra 13	0,15	0,15	0,17	0,19	0,26	0,32	0,45	0,54	0,56	0,46	0,34	0,27	0,23
Amostra 14	0,32	0,30	0,27	0,26	0,29	0,32	0,44	0,54	0,53	0,42	0,30	0,22	0,20
Amostra 15	0,26	0,25	0,24	0,23	0,26	0,31	0,42	0,53	0,55	0,48	0,33	0,25	0,23
Amostra 16	0,26	0,25	0,23	0,22	0,24	0,29	0,37	0,48	0,58	0,54	0,44	0,36	0,30
Amostra 17	0,17	0,18	0,19	0,20	0,23	0,30	0,40	0,52	0,63	0,60	0,49	0,38	0,32
Amostra 18	0,18	0,19	0,19	0,21	0,24	0,30	0,38	0,47	0,56	0,55	0,46	0,37	0,32
Amostra 19	0,25	0,23	0,22	0,22	0,27	0,30	0,35	0,37	0,40	0,36	0,31	0,26	0,23
Amostra 20	0,29	0,28	0,26	0,24	0,26	0,29	0,35	0,38	0,40	0,35	0,29	0,24	0,22
Média da frequência (Hz)	0,24	0,24	0,23	0,23	0,27	0,32	0,41	0,48	0,52	0,47	0,38	0,31	0,27
Desvio padrão por frequência (Hz)	0,07	0,06	0,04	0,03	0,03	0,03	0,05	0,06	0,09	0,13	0,11	0,08	0,07

Fonte: Dados da pesquisa (2019).

Figura 103 – Coeficiente de absorção em banda de 1/3 de oitava do bloco de concreto Convencional.



Fonte: Dados da pesquisa (2019).

APÊNDICE I – Simulação da barreira com NRC = 0,251 (blocos de RCD).

