UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

ALINE LISOT

RESSOADORES DE HELMHOLTZ EM BARREIRAS ACÚSTICAS: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

MARINGÁ

2008

Livros Grátis

http://www.livrosgratis.com.br

Milhares de livros grátis para download.

ALINE LISOT

RESSOADORES DE HELMHOLTZ EM BARREIRAS ACÚSTICAS: AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO NA ATENUAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Estadual de Maringá como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Fernando Soares.

MARINGÁ

2008

ALINE LISOT

Ressoadores de Helmholtz em Barreiras Acústicas: Avaliação do Desempenho na Atenuação do Ruído de Tráfego

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, na área de concentração Infra-estrutura e Sistemas Urbanos, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 20 de fevereiro de 2008.

Profª. Drª. **Fernanda Antonio Simões**

Profª. Drª. **Stelamaris Rolla Bertoli**

Prof. Dr. **Paulo Fernando Soares**
(Orientador)

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

Lisot, Aline
L771r Ressoadores de Helmholtz em barreiras acústicas do desempenho na atenuação do ruído de tráfego / Aline Lisot. -- Maringá : [s.n.], 2008.
161 f. : il. color.

Orientador : Prof. Dr. Paulo Fernando Soares.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana, 2008.

1. Ruido de tráfego - Ressoadores de Helmholtz. 2. Ruido de tráfego. 3. Barreira acústica - Ressoadores de Helmholtz. 4. Barreira acústica - Simulação. 5. Barreira acústica - Difração. I. Universidade Estadual de Maringá. Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana. II. Título.

CDD 21.ed.621

“O silêncio é o ruído mais forte, talvez o mais forte dos ruídos”.

Miles Davis (1926-1991)

À minha mãe, Nelsi, à minha irmã, Anelise e ao meu pai, Anilso.

E um braço amigo para agarrar.

E um ombro para chorar.

E um sorriso aberto como o vento.

Continuo a contar contigo...

AGRADECIMENTOS

Não, não é simplesmente agradecer que quero. Quero trazer para dentro do meu texto aqueles que já o percorrem nas entrelinhas.

A Deus, pela vida, por guiar minhas escolhas e pela capacidade de fazê-las.

À minha mãe, Nelsi, porque é minha mãe e isso bastaria, mas ela sempre fez questão de fazer muito mais. Exemplo de coragem, amor, determinação, retidão e perseverança. Agradeço pelo estímulo e apoio incondicional, pela paciência com a qual sempre me escuta e pela sensatez de suas palavras.

À minha irmã, Anelise, que sempre me incentiva com seus elogios e grande amor; que com seu espírito alegre e contagiante faz-se próxima e presente em todos os momentos.

Ao meu pai, Anilso (in memorian), por ter-me ensinado o gosto pelas "idéias" e pelo exemplo de vida que foi.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Fernando Soares, que se tornou mais que um professor, pela amizade, pela confiança em meu trabalho e pelos valiosos ensinamentos. Seu caráter, postura e dedicação no trabalho a mim servem como exemplo.

Aos colegas da primeira turma de mestrado em Engenharia Urbana da UEM, pelos momentos de brincadeiras e diversão, pela troca de experiências e principalmente pela amizade que construímos.

Às "meninas do mestrado", Aline Hansen, Rakelly, Carla Sander, Carla Marek e Irene pelo grande auxílio nas medições e pelos "cappuccinos".

Ao colega Igor pelas grandes dicas, pelo apoio e pelo companheirismo.

Ao Prof. Carlos Tamanini por sempre estender a mão e por me fazer sentir sua "colega" de caminhada.

Ao colega Oswaldo pela sua imensa paciência, sua competência e grande dedicação me auxiliando na produção dos ressoadores e construção das barreiras acústicas.

Ao Elias e à Janaína que doaram seu tempo e seu esforço às voltas com os ressoadores.

Aos alunos da graduação em Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo (Rogério, Luana, Flávia, Maiara, Nathália e Carol) e também à colega Anelise Dalberto por terem "sujado as mãos de argila" me ajudando a produzir os ressoadores.

À Profª Drª Stelamaris Rolla Bertoli pelo seu coração de mãe e por ceder-me um espaço no LACAF-Unicamp para os ensaios com os ressoadores.

Ao Obadias, ao Daniel e ao Christian pelo auxilio na realização dos ensaios na câmara reverberante e também pela espontaneidade e brincadeiras.

À prefeitura do campus da UEM na pessoa do Samir pela prontidão em providenciar o que solicitei "às pressas" para a construção das barreiras acústicas.

Ao Douglas, secretário da pós-graduação em Engenharia Urbana, pela prontidão e disponibilidade com que sempre me atendeu e também pelas "histórias" que costuma contar.

À Cleonice por ser sempre tão agradável e atenciosa e pelos incontáveis cafezinhos.

À Neusi e ao Juarez, por ainda fazerem parte da minha vida e por tornarem os dias no departamento de Engenharia Civil mais alegres.

À prima Camila, pelos momentos de risos, pelas conversas infindáveis, pelas leituras dos meus textos "às escuras", sempre tentando me ajudar.

Ao tio Anilo, exemplo de vida, por me falar de suas experiências que, em vários momentos, me ajudaram a tomar decisões acertadas.

À minha amiga-irmã Cristiane, que torce tanto pelo meu sucesso e sempre me dá apoio em todos os momentos e decisões.

Ao amigo Hugo, pelas conversas "jogadas fora" e por acreditar e incentivar minhas escolhas, mesmo sem saber quais são.

Ao Prof. Dr. Sylvio Reynaldo Bistafa pela atenção com que esclareceu minhas dúvidas.

À Cerâmica Barra Bonita, na pessoa do Marcelo, pelo interesse em auxiliar na produção do ressoador cerâmico.

À Profª Drª Célia Regina Granhen Tavares pela disposição em ajudar no desenvolvimento desta pesquisa.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aqueles que, após me perguntarem sobre o tema da dissertação, tiveram a paciência de me ouvir. E, ao final, perguntaram tímidos: "Tudo bem... mas o que são ressoadores de Helmholtz?"

Enfim, a todos que de alguma maneira contribuíram na realização deste trabalho, seja pela ajuda ou por uma palavra de amizade.

RESUMO

O presente trabalho constitui-se de um estudo relativo à utilização de ressoadores de Helmholtz em barreiras acústicas para atenuação do ruído de tráfego. Em uma primeira etapa avaliou-se o Nível de Pressão Sonora (NPS) gerado em uma área de tráfego intenso na cidade de Maringá, estado do Paraná. Essa avaliação consistiu da coleta de dados de NPS por faixa de freqüência em bandas de oitava e permitiu verificar-se a geração de níveis acima dos valores aceitáveis por norma na área de estudo, sendo a fonte predominante o tráfego de veículos. Sabe-se que barreiras acústicas são estruturas eficazes no controle do ruído de tráfego. A proposta deste estudo é que estas barreiras sejam construídas de peças cerâmicas moldadas de tal forma que reproduzam ressoadores de Helmholtz. Isto se baseia no fato de que o ruído monitorado tem como destaque elevados NPS nas baixas freqüências, em especial entre 125 e 250Hz, e que os ressoadores são estruturas capazes de absorver o som em freqüências específicas, conforme seu dimensionamento. Desenvolveram-se os ressoadores e, depois de testados em câmara reverberante, verificou-se que seus coeficientes de absorção atendiam às necessidades do projeto. Realizaram-se simulações com barreiras acústicas simples e com ressoadores de Helmholtz no ambiente do programa SoundPLAN®. Ensaiaram-se os mesmos tipos de barreiras na escala 1:5 e calculou-se a perda na inserção destas barreiras. Pela análise dos valores calculados e das simulações, acredita-se que a utilização de ressoadores de Helmholtz em barreiras acústicas pode trazer acréscimos significativos na atenuação do ruído de tráfego nas áreas adjacentes na face das barreiras em que ocorre a geração do ruído.

Palavras-chave: Ressoadores de Helmholtz, Controle de ruído, Ruído de tráfego, Perda na inserção, Difração.

ABSTRACT

The present work is constituted from a study about the use of Helmholtz resonators in acoustic barriers for reduction of the traffic noise. In a first stage was evaluated the Sound Pressure Level (SPL) generated in an area of intense traffic in the city of Maringá, state of Paraná. That evaluation consisted in data collection of SPL in octave frequency bands and it allowed verifying that the generated levels are above the acceptable values in the study area. The predominant source is the traffic of vehicles. It is known that acoustic barriers are efficient structures in the control of the traffic noise. The proposal of this study is build these barriers of special ceramic bricks, which reproduce Helmholtz resonators. That is based in the fact that the monitored noise has as prominence elevated levels in the low frequencies, especially 125 and 250Hz, and that the resonators are structures capable to absorb the sound in specific frequencies, according to its project. Resonators were developed and tested in a reverberation room. It was verified that their absorption coefficients were according to the needs of the project. Simulations were made in the software SoundPLAN® with simple acoustic barriers and with barriers built of resonators. The same types of barriers in scale 1:5 were tested and the insertion loss was calculated. With the analysis of the calculated values and simulations, it is believed that the use of Helmholtz resonators in acoustic barriers can bring significant increments in the reduction of the traffic noise in the adjacent areas on the side of the acoustic barriers where occurs the noise generation.

Keywords: Helmholtz resonators, Noise control, Traffic noise, Insertion loss, Diffraction.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS vi

RESUMO ix

ABSTRACT x

SUMÁRIO xi

LISTA DE FIGURAS xv

LISTA DE GRÁFICOS xxi

LISTA DE TABELAS xxii

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 OBJETIVO GERAL 2

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2

2 ESTADO DA ARTE 3

2.1 BARREIRAS ACÚSTICAS 3

2.2 RESSOADORES DE HELMHOLTZ 9

3 REVISÃO TEÓRICA 14

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOM 14

3.1.1 O RUÍDO E O SER HUMANO 14

3.1.2 ONDAS SONORAS 16

3.1.3 FREQÜÊNCIA 17

3.1.4 COMPRIMENTO DE ONDA 17

3.1.5 VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM 19

3.1.6 UNIDADE DE MEDIDA DO SOM 20

3.1.7 ALTURA, INTENSIDADE E TIMBRE 24

3.2 RUÍDO OCASIONADO PELO TRÁFEGO URBANO 24

3.3 PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE 25

3.3.1 CONTROLE DO RUÍDO 26

3.3.2 BARREIRAS ACÚSTICAS 27

3.3.3 A DIFRAÇÃO 31

3.4 PERDA NA INSERÇÃO DA BARREIRA 34

3.5 RESSOADOR DE HELMHOLTZ 38

3.6 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE 41

3.7 LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO 42

3.7.1 LEI COMPLEMENTAR Nº 218/98 42

3.7.2 NBR 10151/2000 43

3.7.3 ISO 354/2003 44

4 AVALIAÇÃO DE BARREIRAS: PROCEDIMENTOS 46

4.1 ÁREAS DE ESTUDO 46

4.2 METODOLOGIA 49

4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO NA ÁREA DE ESTUDO 49

4.2.2 DIMENSIONAMENTO E FABRICAÇÃO DOS RESSOADORES DE HELMHOLTZ 53

4.2.3 DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE DOS RESSOADORES DE HELMHOLTZ EM CÂMARA REVERBERANTE 59

4.2.4 CONSTRUÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS NA ESCALA 1:5 E AVALIAÇÃO DO NPS RESULTANTE 67

4.2.5 SIMULAÇÃO DE BARREIRAS ACÚSTICAS COM O PROGRAMA SOUNDPLAN® 77

4.2.6 APLICAÇÃO DO CONCEITO DE PERDA NA INSERÇÃO 82

5 RESULTADOS E ANÁLISES 83

5.1.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA DE ESTUDO QUANDO AO NPS 83

5.1.2 DIMENSÕES DOS RESSOADORES DE HELMHOLTZ EM ESCALA 1:5 88

5.1.3 COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE DOS RESSOADORES DE HELMHOLTZ DETERMINADO EM CÂMARA REVERBERANTE 91

5.1.4 ATENUAÇÃO PROPORCIONADA PELAS BARREIRAS ACÚSTICAS NA ESCALA 1:5 COM TIJOLOS SIMPLES E COM RESSOADORES DE HELMHOLTZ 98

5.1.5 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS COM O PROGRAMA SOUNDPLAN® 102

5.1.6 APLICAÇÃO DO CONCEITO DE PERDA NA INSERÇÃO 127

6 CONCLUSÕES 132

7 REFERÊNCIAS 134

ANEXO A – TRUERTA™ 138

ANEXO B - LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E FÍSICA APLICADA DA UNIVERSIDADE DE CAMPINAS 139

ANEXO C – SOUNDPLAN®: PRINCÍPIOS DE CÁLCULO 141

1. PROPAGAÇÃO SONORA 141

2. ABSORÇÃO DO AR 142

3. DIFRAÇÃO 142

4. EFEITO DO SOLO, K_Ω 143

5. REFLEXÃO 144

6. O MÉTODO DA PESQUISA POR ÂNGULO 144

7. VELOCIDADE VERSUS PRECISÃO 144

ANEXO D – NORMA ALEMÃ RLS - 90 146

1. INTRODUÇÃO 146

2. O NÍVEL L_{25} 146

2.1. CORREÇÃO $C_{VELOCIDADE}$ 147

2.2. CORREÇÃO DEVIDO À SUPERFÍCIE DA RUA - $C_{SUPERFÍCIE}$ 147

2.3. CORREÇÃO DEVIDO AO GRADIENTE DA RUA - $C_{GRADIENTE}$ 147

2.4. CORREÇÃO DEVIDO ÀS MÚLTIPLAS REFLEXÕES - $C_{REFLEXÕES}$ 147

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS NA CÂMARA ACÚSTICA 149

APÊNDICE B – DADOS COLETADOS DURANTE O MONITORAMENTO DE NPS NAS BARREIRAS NA ESCALA 1:5 156

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – MEDIDA DE RUÍDO PARA O PROJETO DE BARREIRA ACÚSTICA. 3

FIGURA 2.2 – PAINÉIS DE MADEIRA REFLETORES. 4

FIGURA 2.3 – PAINÉIS DE MADEIRA REFLETORES. 5

FIGURA 2.4 – BARREIRA ACÚSTICA DE TIJOLOS CERÂMICOS (MARINGÁ) 6

FIGURA 2.5 – BARREIRA ACÚSTICA DE MADEIRA (ROMA, ITÁLIA) 6

FIGURA 2.6 – BARREIRA ACÚSTICA DE TERRA 7

FIGURA 2.7 – BARREIRA ACÚSTICA DE ACRÍLICO (ROMA, ITÁLIA) 7

FIGURA 2.8 – BARREIRA ACÚSTICA DE METAL E ACRÍLICO (PISA, ITÁLIA) 8

FIGURA 2.9 – MODELO DE BARREIRA ACÚSTICA COM DIFRATOR LAMELAR NO TOPO. 8

FIGURA 2.10 – MODIFICAÇÕES NO TOPO DA BARREIRA ACÚSTICA. 9

FIGURA 2.11 – VASOS ACÚSTICOS. 10

FIGURA 2.12 – ABERTURAS DOS VASOS ACÚSTICOS NA IGREJA DE VILLETTE, SUÍÇA. 11

FIGURA 2.13 – VASO ACÚSTICO UTILIZADO NA IGREJA DE VILLETTE ENCONTRADO EM 1927. 11

FIGURA 2.14 – VASOS ACÚSTICOS DA IGREJA DE SYENS. 12

FIGURA 2.15 – RESSOADOR DE VIDRO. 12

FIGURA 2.16 – RESSOADORES DE HELMHOLTZ – GARLAND COLLECTION OF CLASSIS PHYSICS APPARATUS. 13

FIGURA 3.1 – ANATOMIA DO OUVIDO HUMANO 15

FIGURA 3.2 – REPRESENTAÇÃO DA PROPAGAÇÃO SONORA NO AR 16

FIGURA 3.3 – ESPECTRO DE RUÍDO EM BANDA DE OITAVA 17

FIGURA 3.4 – COMPRIMENTO DE ONDA DE ONDAS DE DIFERENTES FREQÜÊNCIAS 18

FIGURA 3.5 – ESCALA LINEAR VERSUS ESCALA LOGARÍTMICA 21

FIGURA 3.6 – MECANISMOS MAIS SIGNIFICATIVOS DA ATENUAÇÃO SONORA AO AR LIVRE 26

FIGURA 3.7 – ESQUEMA DA DIVISÃO DO SOM AO ENCONTRAR UM OBSTÁCULO 28

FIGURA 3.8 – VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE MATERIAIS ABSORVENTES POROSOS E FIBROSOS SEGUNDO A FREQÜÊNCIA 30

FIGURA 3.9 – ONDA DIFRATADA EM UM PEQUENO ORIFÍCIO 32

FIGURA 3.10 – DIFRAÇÃO EM UM CANTO DO OBSTÁCULO 33

FIGURA 3.11 – DIFRAÇÃO ATRAVÉS DE UMA ABERTURA EM UM OBSTÁCULO 33

FIGURA 3.12 – DIFRAÇÃO EM VOLTA DE UM OBJETO 33

FIGURA 3.13 – DIFRAÇÃO DE ONDAS SONORAS 34

FIGURA 3.14 – ILUSTRAÇÃO DA BARREIRA NA TRAJETÓRIA DO RUÍDO 35

FIGURA 3.15 – PERDA NA INSERÇÃO VERSUS NÚMERO DE FRESNEL PARA DADOS EXPERIMENTAIS E EMPÍRICOS 37

FIGURA 3.16 – ILUSTRAÇÃO DA TRAJETÓRIA DA ONDA SONORA DEVIDO À BARREIRA ACÚSTICA 37

FIGURA 3.17 – MODELO GENÉRICO DE RESSOADOR DE HELMHOLTZ 39

FIGURA 3.18 – RESSOADOR DE HELMHOLTZ 40

FIGURA 4.1 – ÁREA DE ESTUDO: AVENIDA COLOMBO 47

FIGURA 4.2 – ÁREA DE ESTUDO: UEM, IMAGEM AÉREA 48

FIGURA 4.3 – ÁREA DE ESTUDO: UEM 48

FIGURA 4.4 – PONTOS DE MONITORAMENTO DE NÍVEL DE PRESSÃO SONORA – AVENIDA COLOMBO 49

FIGURA 4.5 – ÁREA DE MONITORAMENTO A PARTIR DA CALÇADA 50

FIGURA 4.6 – PONTO DE MONITORAMENTO P1 51

FIGURA 4.7 – PONTO DE MONITORAMENTO P2 52

FIGURA 4.8 – PONTO DE MONITORAMENTO P5 52

FIGURA 4.9 – PONTO DE MONITORAMENTO P6 53

FIGURA 4.10 – SECAGEM DA ARGILA AO SOL 54

FIGURA 4.11 – DESTORROAMENTO DA ARGILA 55

FIGURA 4.12 – PASTA DE ARGILA COM ÁGUA 55

FIGURA 4.13 – BOQUILHA 56

FIGURA 4.14 – MAROMBA 56

FIGURA 4.15 – EXTRUSÃO E CORTE DOS RESSOADORES 57

FIGURA 4.16 – FORNO UTILIZADO NA QUEIMA DOS RESSOADORES 58

FIGURA 4.17 – PEÇA FABRICADA 58

FIGURA 4.18 – CORTE PARA FORMAR O RESSOADOR 59

FIGURA 4.19 – RESSOADOR DE HELMHOLTZ 59

FIGURA 4.20 – MONTAGEM DO PAINEL DE RESSOADORES 60

FIGURA 4.21 – PAINEL DE RESSOADORES 61

FIGURA 4.22 – VEDAÇÃO DAS LATERAIS DO PAINEL 61

FIGURA 4.23 – LOCAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIÇÃO E DA FONTE SONORA NA CÂMARA REVERBERANTE 62

FIGURA 4.24 – PONTO P1 E FONTE SONORA NA POSIÇÃO F1 COM PAINEL DE RESSOADORES COM JUNTAS SEM VEDAÇÃO 63

FIGURA 4.25 – PONTO P4 E FONTE SONORA NA POSIÇÃO F2 COM PAINEL DE RESSOADORES COM JUNTAS SEM VEDAÇÃO 63

FIGURA 4.26 – VEDAÇÃO DAS JUNTAS DO PAINEL DE RESSOADORES COM COLA QUENTE 64

FIGURA 4.27 – PAINEL DE RESSOADORES COM AS JUNTAS VEDADAS COM COLA QUENTE 64

FIGURA 4.28 – PONTO P2 E FONTE SONORA NA POSIÇÃO F2 COM PAINEL DE RESSOADORES COM JUNTAS VEDADAS 65

FIGURA 4.29 – PONTO P1 COM A FONTE SONORA NA POSIÇÃO F1 SEM O PAINEL DE RESSOADORES 66

FIGURA 4.30 – MEDIDOR DE TEMPERATURA E UMIDADE 66

FIGURA 4.31 – LOCAÇÃO DAS BARREIRAS NA ESCALA 1:5 67

FIGURA 4.32 – BARRAS DE AÇO: INÍCIO DA CONSTRUÇÃO 68

FIGURA 4.33 – CONSTRUÇÃO DA BARREIRA SIMPLES: PRIMEIRA FIADA 69

FIGURA 4.34 – CONSTRUÇÃO DA BARREIRA SIMPLES: APLICAÇÃO DA COLA QUENTE 69

FIGURA 4.35 – CONSTRUÇÃO DA BARREIRA DE RESSOADORES: POSICIONAMENTO DAS PEÇAS 70

FIGURA 4.36 – CONSTRUÇÃO DAS BARREIRAS ACÚSTICAS: VEDAÇÃO E REGULARIZAÇÃO DO TOPO 70

FIGURA 4.37 – BARREIRAS ACÚSTICAS 71

FIGURA 4.38 – PONTOS DE COLETA DE DADOS PARA ANÁLISE DAS BARREIRAS ACÚSTICAS NA ESCALA 1:5 72

FIGURA 4.39 – AMPLIFICADOR 73

FIGURA 4.40 – BARREIRA SIMPLES: MICROFONE OMNIDIRECIONAL E MEDIDORES DE NPS NO PONTO P1 VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 74

FIGURA 4.41 – BARREIRA SIMPLES: MICROFONE OMNIDIRECIONAL NO PONTO P1 E MEDIDORES DE NPS NO PONTO P2 75

FIGURA 4.42 – BARREIRA DE RESSOADORES: MICROFONE OMNIDIRECIONAL NO PONTO P1 E MEDIDORES DE NPS NO PONTO P3 COM RESSOADORES VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 75

FIGURA 4.43 – BARREIRA DE RESSOADORES: MICROFONE OMNIDIRECIONAL NO PONTO P1 E MEDIDORES DE NPS NO PONTO P6 COM RESSOADORES NA FACE DA BARREIRA OPOSTA À GERAÇÃO DO RUÍDO 76

FIGURA 4.44 – MEDIÇÃO SEM BARREIRA: MICROFONE OMNIDIRECIONAL NO PONTO P1 E MEDIDORES DE NPS NO PONTO P6 77

FIGURA 4.45 – MAPA DA ÁREA DE MONITORAMENTO DO RUÍDO DE TRÁFEGO INSERIDA NO AMBIENTE DO PROGRAMA SOUNPLAN® 78

FIGURA 4.46 – OBJETOS JÁ CARACTERIZADOS NO AMBIENTE DO PROGRAMA SOUNDPLAN® 79

FIGURA 4.47 – CARACTERÍSTICAS DE ABSORÇÃO SONORA DA BARREIRA SIMPLES 80

FIGURA 4.48 – PROPRIEDADE DE ABSORÇÃO DO SOLO 81

FIGURA 4.49 – OBJETOS INSERIDOS NO AMBIENTE DO PROGRAMA SOUNDPLAN® 81

FIGURA 5.1 – RESSOADOR DE HELMHOLTZ NA ESCALA 1:5 89

FIGURA 5.2 – POSICIONAMENTO DAS ABERTURAS DOS RESSOADORES 90

FIGURA 5.3 – VOLUME DO RESSOADOR 90

FIGURA 5.4 – RESSOADOR DE HELMHOLTZ: FORMAÇÃO DE UM SEGUNDO VOLUME 98

FIGURA 5.5 – CARACTERÍSTICAS DE ABSORÇÃO DA BARREIRA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ 102

FIGURA 5.6 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO SEM BARREIRA ACÚSTICA: VALORES EM dB103

FIGURA 5.7 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO SEM BARREIRA ACÚSTICA: VALORES EM dB(A) 104

FIGURA 5.8 – PROCESSO DE SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 105

FIGURA 5.9 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 106

FIGURA 5.10 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 107

FIGURA 5.11 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA OS RECEPTORES 108

FIGURA 5.12 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES SEM BARREIRA E COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 110

FIGURA 5.13 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES SEM BARREIRA ACÚSTICA E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 111

FIGURA 5.14 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES SEM BARREIRA ACÚSTICA E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA OS RECEPTORES 112

FIGURA 5.15 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 113

FIGURA 5.16 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA OS RECEPTORES 114

FIGURA 5.17 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO SEM BARREIRA ACÚSTICA 117

FIGURA 5.18 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 118

FIGURA 5.19 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 119

FIGURA 5.20 – RESULTADO DA SIMULAÇÃO COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA OS RECEPTORES 120

FIGURA 5.21 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES SEM BARREIRA E COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 122

FIGURA 5.22 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES SEM BARREIRA ACÚSTICA E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 123

FIGURA 5.23 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES SEM BARREIRA ACÚSTICA E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA OS RECEPTORES 124

FIGURA 5.24 – COMPARAÇÃO ENTRE AS SIMULAÇÕES COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES E COM BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE SONORA 125

FIGURA 5.25 – BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 128

FIGURA 5.26 – BARREIRA ACÚSTICA COM RESSOADORES DE HELMHOLTZ 128

FIGURA B.1 – GEOMETRIA DA CÂMARA REVERBERANTE 139

FIGURA C.1 – PROPAGAÇÃO SONORA PARA UMA FONTE LINEAR 142

FIGURA C.2 – DIVISÃO DA GEOMETRIA NA PESQUISA POR ÂNGULOS 145

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 5.1 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO **94**

GRÁFICO 5.2 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE PARA RESSOADORES EM TAMANHO REAL **97**

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO DO SOM NO AR DE ACORDO COM A VARIAÇÃO DA TEMPERATURA 20

TABELA 3.2 – PRINCIPAIS NÍVEIS DE GRANDEZAS ACÚSTICAS 22

TABELA 3.3 – EFEITOS DOS DIFERENTES NÍVEIS DA PERDA NA INSERÇÃO 35

TABELA 3.4 – LIMITES MÁXIMOS DE SONS E RUÍDO PERMISSÍVEIS 43

TABELA 3.5 – NÍVEL DE CRITÉRIO DE AVALIAÇÃO NCA PARA AMBIENTES EXTERNOS, EM DB(A) 43

TABELA 4.1 – PERÍODOS DE MONITORAMENTO DO RUÍDO NA AVENIDA COLOMBO 53

TABELA 4.2 – DISTÂNCIA DA FONTE SONORA E RECEPTORES EM RELAÇÃO À BARREIRA ACÚSTICA 72

TABELA 5.1 – VALORES DE NPS COLETADOS COM O MEDIDOR DE NPS DA 01DB® 84

TABELA 5.2 – VALORES DE NPS COLETADOS COM O MICROFONE OMNIDIRECIONAL CONECTADO AO SOFTWARE TRUERTA™ 85

TABELA 5.3 – VALORES CALIBRADOS DE NPS COLETADOS COM O MICROFONE OMNIDIRECIONAL CONECTADO AO SOFTWARE TRUERTA™ 86

TABELA 5.4 – ESPECTRO DA FONTE SONORA 87

TABELA 5.5 – ATENUAÇÃO SONORA VERIFICADA 88

TABELA 5.6 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO MEDIDOS NA CÂMARA REVERBERANTE 93

TABELA 5.7 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE 95

TABELA 5.8 – COEFICIENTES DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE PARA RESSOADORES EM TAMANHO REAL 96

TABELA 5.9 – ATENUAÇÃO SONORA VERIFICADA: 21/12/2007 99

TABELA 5.10 – ATENUAÇÃO SONORA VERIFICADA: VALORES CORRIGIDOS 100

TABELA 5.11 – VARIAÇÃO DA ATENUAÇÃO EM RELAÇÃO À BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 101

TABELA 5.12 – VARIAÇÃO DA ATENUAÇÃO ENTRE BARREIRA COM RESSOADORES VOLTADOS PARA A FONTE E PARA OS RECEPTORES 101

TABELA 5.13 – ABSORÇÃO SONORA DE SABINE DOS RESSOADORES DE HELMHOLTZ 102

TABELA 5.14 – ESPECTRO DA FONTE SONORA 103

TABELA 5.15 – VALORES DE NPS PARA CADA RECEPTOR 109

TABELA 5.16 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PRÓXIMO À AVENIDA COLOMBO – PARTE 1 115

TABELA 5.17 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS PRÓXIMO À AVENIDA COLOMBO – PARTE 2 116

TABELA 5.18 – DIMENSÕES DAS BARREIRAS 117

TABELA 5.19 – VALORES DE NPS PARA CADA RECEPTOR 121

TABELA 5.20 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NA ÁREA DESTINADA À CONSTRUÇÃO DAS BARREIRAS ACÚSTICAS EM ESCALA– PARTE 1 126

TABELA 5.21 – RESULTADO DAS SIMULAÇÕES REALIZADAS NA ÁREA DESTINADA À CONSTRUÇÃO DAS BARREIRAS ACÚSTICAS EM ESCALA– PARTE 2 127

TABELA 5.22 – CÁLCULO DOS VALORES DE Δ PARA CADA POSIÇÃO DE RECEPTOR 129

TABELA 5.23 – CÁLCULO DOS VALORES DE N PARA CADA POSIÇÃO DE RECEPTOR COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 129

TABELA 5.24 – CÁLCULO DOS VALORES DE N PARA CADA POSIÇÃO DE RECEPTOR COM BARREIRA ACÚSTICA COM RESSOADORES DE HELMHOLTZ 130

TABELA 5.25 – PERDA NA INSERÇÃO PARA CADA POSIÇÃO DE RECEPTOR COM BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 130

TABELA 5.26 – PERDA NA INSERÇÃO PARA CADA POSIÇÃO DE RECEPTOR COM BARREIRA ACÚSTICA COM RESSOADORES DE HELMHOLTZ 131

TABELA C.1 – VALORES DE K_Ω PARA DIFERENTES GEOMETRIAS 144

TABELA B.1 – CORREÇÃO DEVIDO À SUPERFÍCIE DA RUA 147

TABELA A.1 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO NA CÂMARA ACÚSTICA COM PAINEL DE RESSOADORES SEM VEDAÇÃO DAS JUNTAS E COM FONTE SONORA NA POSIÇÃO F1 149

TABELA A.2 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO NA CÂMARA ACÚSTICA COM PAINEL DE RESSOADORES SEM VEDAÇÃO DAS JUNTAS E COM FONTE SONORA NA POSIÇÃO F2 150

TABELA A.3 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO NA CÂMARA ACÚSTICA COM PAINEL DE RESSOADORES COM VEDAÇÃO DAS JUNTAS E COM FONTE SONORA NA POSIÇÃO F1 151

TABELA A.4 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO NA CÂMARA ACÚSTICA COM PAINEL DE RESSOADORES COM VEDAÇÃO DAS JUNTAS E COM FONTE SONORA NA POSIÇÃO F2 152

TABELA A.5 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO COM A CÂMARA ACÚSTICA VAZIA E COM FONTE SONORA NA POSIÇÃO F1 153

TABELA A.6 – TEMPOS DE REVERBERAÇÃO COM A CÂMARA ACÚSTICA VAZIA E COM FONTE SONORA NA POSIÇÃO F2 154

TABELA A.7 – UMIDADE RELATIVA E TEMPERATURA NA CÂMARA REVERBERANTE DURANTE OS ENSAIOS 155

TABELA B.2 – DADOS DO MONITORAMENTO SEM BARREIRA ACÚSTICA 156

TABELA B.3 – DADOS DO MONITORAMENTO DA BARREIRA ACÚSTICA SIMPLES 157

TABELA B.4 – DADOS DO MONITORAMENTO DA BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA A FONTE 158

TABELA B.5 – DADOS DO MONITORAMENTO DA BARREIRA ACÚSTICA DE RESSOADORES DE HELMHOLTZ VOLTADOS PARA OS RECEPTORES 159

TABELA B.6 – DADOS DO MONITORAMENTO DAS BARREIRAS ACÚSTICAS EM ESCALA 160

TABELA B.7 – DADOS CALIBRADOS DO MONITORAMENTO DAS BARREIRAS ACÚSTICAS EM ESCALA 161

1 INTRODUÇÃO

"Alvoroço, barulho, escândalo, escarcéu". "Toda fonte de erro, distúrbio ou deformação de fidelidade na transmissão de uma mensagem visual, escrita, sonora, etc.; sinal indesejável que não pertence à mensagem intencionalmente transmitida". "Som constituído por grande número de vibrações acústicas com relações de amplitude e fase distribuídas ao acaso". Estas são algumas das inúmeras definições para o vocábulo "ruído", as quais são citadas no Dicionário Aurélio - Século XXI (1999).

Percebe-se que cada uma das definições dá uma conotação diferente a tal palavra, no entanto, todas transmitem uma sensação de desconforto. Desde a definição mais singela, ou seja, barulho; ou aquela que faz menção ao ruído como uma distorção de uma mensagem; até o seu significado físico direcionam a um ponto central e põem em evidência o caráter de poluidor sonoro do ruído.

O ruído, enquanto poluição sonora, constitui um elemento de degradação ambiental. A diferença em comparação a outros problemas ambientais é que o ruído tem relação com a cultura e o cotidiano da sociedade. As origens do ruído podem ser inúmeras, como as obras, os estabelecimentos industriais, estabelecimentos comerciais e o tráfego de veículos em vias públicas, que neste trabalho recebeu uma atenção especial.

No último século foi possível observar um intenso crescimento urbano de várias cidades brasileiras. Paralelamente a este crescimento surgiram problemas de cunho social e ambiental tal como o ruído proveniente do tráfego, o qual é capaz de provocar efeitos danosos à saúde da população.

Observa-se que em ambientes urbanos a incidência deste problema é mais acentuada e agravada por utilizações conflituosas do espaço público. O ser humano em seu dia-a-dia freqüenta estes espaços e acaba por se expor constantemente à ação do ruído em seu organismo. Caso a exposição ao ruído seja excessiva, pode ocasionar distúrbios no sono, má compreensão da palavra falada, propensão à irritabilidade e até, em casos extremos, a perda da audição.

Frente aos problemas gerados pelo ruído surgem questões referentes à qualidade do meio onde está inserida a população, ou seja, questões referentes ao bem estar desta população. No que se refere ao ruído de tráfego, buscam-se intervenções no meio que possam diminuir

a intensidade dos sons que atingem o receptor, a população em geral. A utilização de barreiras acústicas tem se difundido como uma alternativa para o controle de ruído. No Brasil esta prática ainda é incipiente, mas no exterior é muito utilizada.

O ruído de tráfego é de baixa freqüência, fato este que se traduz em uma grande capacidade de contornar obstáculos. Portanto, barreiras acústicas em altura inadequada não constituem um meio eficiente de diminuir o Nível de Pressão Sonora (NPS) que atinge o receptor.

Acredita-se que uma forma de melhorar o desempenho de barreiras acústicas é a utilização de ressoadores de Helmholtz na sua execução. Os ressoadores são peças que têm a capacidade de absorver sons em freqüências específicas, principalmente as mais baixas, conforme o seu dimensionamento.

Neste contexto apresentam-se os objetivos deste trabalho.

1.1 OBJETIVO GERAL

- ✓ Estudar o desempenho de barreiras acústicas construídas com ressoadores de Helmholtz na atenuação do ruído de tráfego.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Abordar, em uma revisão teórica, os conceitos empregados no desenvolvimento deste trabalho.
- ✓ Caracterizar o ruído gerado pelo tráfego de veículos segundo seu espectro sonoro.
- ✓ Dimensionar e produzir ressoadores de Helmholtz de cerâmica de acordo com o espectro sonoro medido.
- ✓ Determinar em laboratório as características de absorção sonora dos ressoadores produzidos.
- ✓ Construir e testar barreiras acústicas construídas com as peças produzidas.
- ✓ Simular o desempenho de barreiras acústicas construídas com ressoadores de Helmholtz com o programa SoundPLAN®.
- ✓ Calcular a perda na inserção das barreiras acústicas construídas.

2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo divide-se em duas partes. A primeira faz um pequeno relato sobre a pesquisa e a utilização de barreiras acústicas. A segunda aborda a origem dos ressoadores de Helmholtz enquanto dispositivos de absorção sonora.

2.1 BARREIRAS ACÚSTICAS

As barreiras acústicas foram construídas intuitiva e raramente desde a metade do século XX, quando o tráfego de veículos começou a aumentar. Somente no final dos anos 1960 a ciência acústica começou a validar a eficácia de barreiras acústicas projetadas nas adjacências de vias específicas (WIKIPEDIA, 2008a).

Nos Estados Unidos da América foram estudadas dezenas de estradas existentes e projetadas. A maioria destes estudos foi solicitada pelo Departamento de Auto-estradas. Foram quatro grupos envolvidos nestas pesquisas: Caltrans Headquartes em Sacramento, Califórnia; ESL inc. em Palo Alto, Califórnia; Bolt, Beranek e Newman em Cambridge, Massachusetts e uma equipe de pesquisadores da Universidade da Flórida. É possível que o primeiro trabalho publicado sobre uma barreira acústica projetada cientificamente tenha sido o estudo para a "Foothill Expressway" em Los Altos, Califórnia (WIKIPEDIA, 2008b). Até o final dos anos 1970 vários grupos de pesquisa nos Estados Unidos da América aplicavam modelos computacionais semelhantes e abordavam pelo menos duzentos diferentes pontos de estudo. A Figura 2.1 traz um pesquisador efetuando medidas de ruído para o projeto de uma barreira acústica em Santa Clara County, na Califórnia.

Figura 2.1 – Medida de ruído para o projeto de barreira acústica.
Fonte: WIKIPEDIA (2008b)

Ainda conforme Wikipedia (2008b), a partir de 2006, esta tecnologia foi considerada um padrão na avaliação da poluição sonora em rodovias, mas, curiosamente, a natureza e a precisão dos modelos computacionais são praticamente idênticas as da versão original desta tecnologia, do ano 1970.

Em março de 2006 foi instalada a primeira barreira acústica de madeira em Portugal junto a um campo de golfe na freguesia do Estoril, Cascais, na região de Lisboa. A empresa responsável chama-se "Complage, Construções e Projectos, S.A". e denominou a barreira de "Painéis acústicos de madeira refletores". Na Figura 2.2 observa-se a barreira instalada.

Figura 2.2 – Painéis de madeira refletores.
Fonte: COMPLAGE (2008)

Vê-se na Figura 2.2 a barreira acústica instalada ao longo da rodovia e acima dela uma tela de proteção. Na Figura 2.3 pode-se observar o mesmo tipo de barreira em mais detalhes.

Figura 2.3 – Painéis de madeira refletores.

Fonte: COMPLAGE (2008)

Suh, Mongeau e Bolton (2001) mencionam que barreiras acústicas têm sido empregadas para controlar o ruído de tráfego há várias décadas e que elas podem ser construídas de madeira, estuque, concreto, alvenaria, metal e outros materiais. Também salientam que estudos recentes para o desenvolvimento da tecnologia de barreiras acústicas incluem o estudo dos efeitos do vento, de gradientes térmicos, dos tratamentos superficiais de absorção da barreira bem como de modificações na geometria do topo da barreira. Em relação ao emprego de materiais absorventes em barreiras acústicas, já foram realizados estudos buscando uma forma de maximizar o desempenho de barreiras com altura limitada.

Na sociedade moderna tornou-se impossível eliminar vias de comunicação ou reduzir o número de veículos que circulam. Hoje, as circunstâncias impõem a aplicação de medidas atenuadoras de forma a melhorar, ou pelo menos manter, a qualidade de vida das pessoas.

No que diz respeito ao controle do ruído, as barreiras acústicas são medidas que permitem chegar-se a bons resultados. Devido aos elevados NPS gerados nas grandes cidades principalmente pelo tráfego de veículos, as barreiras tornaram-se indispensáveis.

O princípio básico de funcionamento das barreiras acústicas é que se obstrua a linha de visão entre fonte sonora e receptor e desta forma se interfira na trajetória das ondas sonoras. Apresentam-se nas Figuras 2.4, 2.5 e 2.6 barreiras acústicas constituídas respectivamente de tijolos cerâmicos, madeira e terra fazendo uma alteração do relevo.

Figura 2.4 – Barreira acústica de tijolos cerâmicos (Maringá)

Figura 2.5 – Barreira acústica de madeira (Roma, Itália)

Figura 2.6 – Barreira acústica de terra

Fonte: FHWA (2001)

Encontram-se também no mercado barreiras acústicas em acrílico. Estas são uma solução eficiente quando se deseja manter a transparência e ao mesmo tempo reduzir o ruído proveniente do tráfego que atinge a população (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Barreira acústica de acrílico (Roma, Itália)

Os painéis acústicos metálicos são outro tipo de barreira. Compostos por caixas de aço galvanizado com lã mineral no seu interior exercem tanto a função de absorver quanto de isolar do ruído. Na Figura 2.8 observa-se uma barreira composta por painéis acústicos metálicos associados a painéis em acrílico.

Figura 2.8 – Barreira acústica de metal e acrílico (Pisa, Itália)

Existem vários pesquisadores que investigam a melhor conformação e constituição de barreiras acústicas para uma atenuação de ruído ótima. De acordo com Boone (2005), uma forma de manipular o comportamento das ondas sonoras para obter maior atenuação é a utilização de chapas horizontais finas, ou lamelas, colocadas no topo da barreira acústica (Figura 2.9).

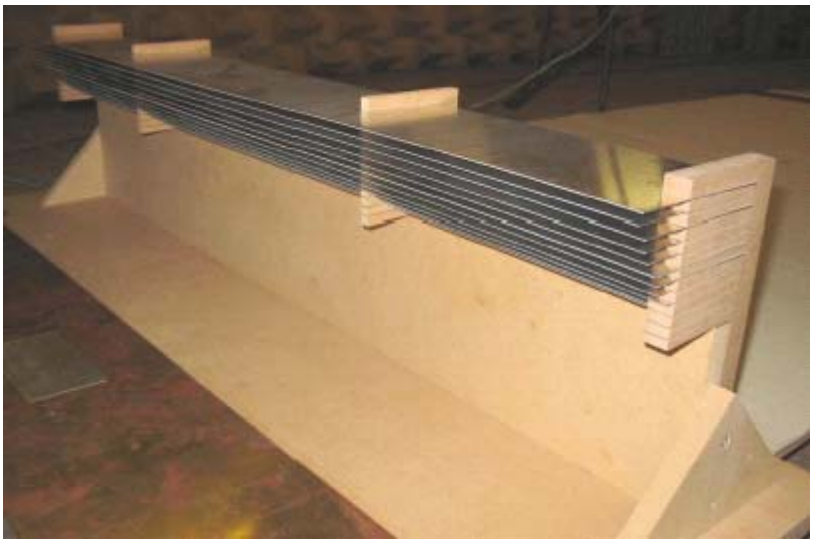


Figura 2.9 – Modelo de Barreira Acústica com Difrator Lamelar no Topo.
Fonte: BOONE (2005)

A vantagem desta aplicação se encontra no fato de as lamelas horizontais serem bem menos resistentes ao vento se comparadas a uma barreira fechada e mais alta. Trata-se de

uma construção aberta por onde passam também as ondas sonoras. No entanto, o posicionamento das lamelas é tal que interfere destrutivamente na transmissão do ruído.

Boone (2005) salienta que a redução do ruído ocorre pela mudança de fase da onda sonora ao passar pelas lamelas. É possível ajustar a fase obtida alterando as larguras das lamelas, sendo estas larguras funções da altura da fonte sonora.

Outra pesquisa interessante foi a realizada por Sakuma (2005) que propõem a modificação do topo da barreira acústica conforme ilustra a figura 2.10 para obter maior atenuação do NPS.

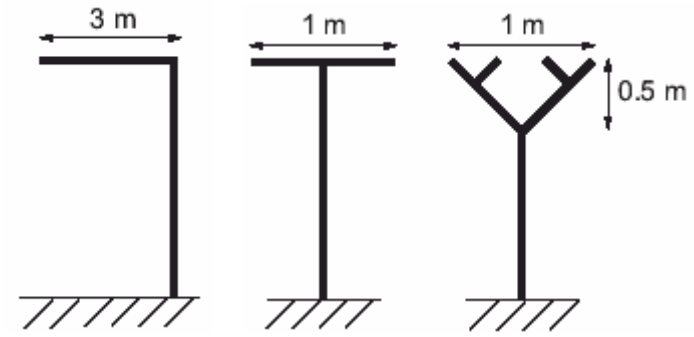


Figura 2.10 – Modificações no Topo da Barreira Acústica.
Fonte: SAKUMA (2005)

Sakuma (2005) analisou a performance tridimensional da barreira acústica antes e após a introdução de tais modificações.

Por meio da explanação efetuada sobre barreiras acústicas é possível perceber que se trata de um campo de pesquisa bastante amplo e cuja importância relaciona-se diretamente à qualidade de vida da população. Este é um dos motivos que impulsionou a realização desta pesquisa onde se realizou o estudo do desempenho de uma barreira acústica destinada ao controle da propagação do ruído de tráfego.

2.2 RESSOADORES DE HELMHOLTZ

Práticas e conceitos acústicos há muito empregados se perderam no tempo e reapareceram em um estágio mais avançado que o anterior. Como exemplo têm-se os ressoadores, empregados pelos Gregos e Romanos nos seus teatros e também nas igrejas Românicas de toda Europa. Conforme Crunelle (2008) vasos eram inseridos nas paredes e representavam uma tentativa consciente de dar um caráter acústico específico para um espaço. Aparentemente o uso destes vasos limitou-se a teatros construídos de pedra ou de

mármore. Crunelle (2008) explica que Vitrúvio (1960) em "The ten books on architecture" ensina que os vasos vêm dos Gregos e também dá procedimentos de como escolher as suas dimensões e o posicionamento. Na Figura 2.11 tem-se um exemplo da aplicação de vasos acústicos em teatros antigos.

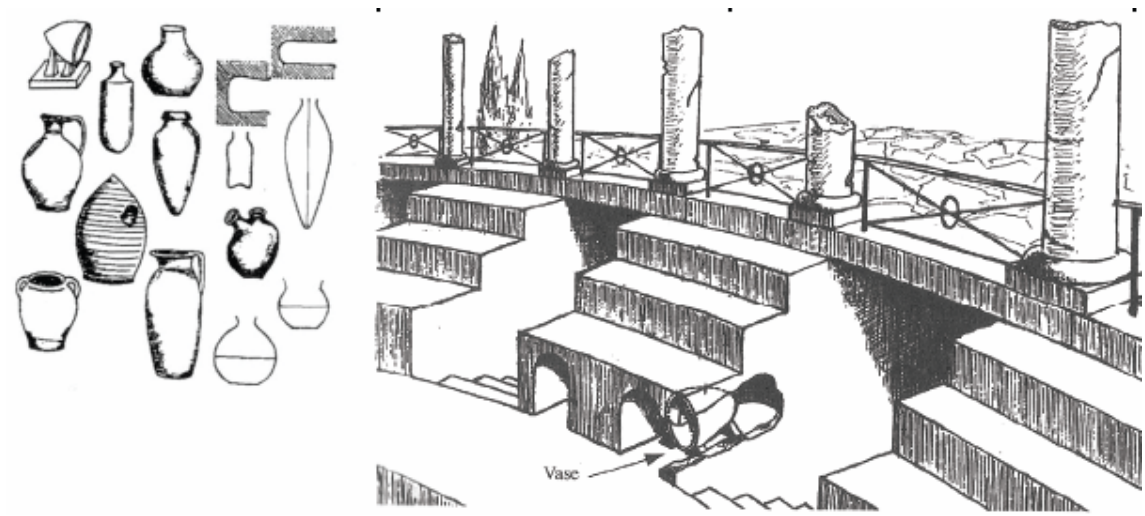


Figura 2.11 – Vasos acústicos.
Fonte: REMY (2008)

Na Idade Média os vasos reapareceram nas igrejas. Encontrados em basílicas e capelas por toda Europa não foram empregados sistematicamente. Em Paris os vasos acústicos podem ser encontrados na capela do "Conservatoire des Arts et Métiers", mas não em grandes igrejas. Por outro lado, ao norte de Paris é possível encontrá-los em basílicas e catedrais. Em Bruxelas não foi feito um levantamento detalhado, mas todavia encontram-se vasos em "St. Rombeau de Malines". Em Bolonha, Itália, a Basílica de São Petrônio contém mais de quatrocentos vasos e, não muito longe, em São Pedro são encontrados somente vinte cinco, os quais são de diferentes diâmetros (CRUNELLE, 2008).

Segundo Crunelle (2008) atualmente cerca de duzentas igrejas na Europa contém vasos acústicos, metade das quais na França. Há muita diversidade na colocação das peças, algumas vezes no coro, ou nas paredes laterais ou nas abóbadas, o que dificulta o entendimento da técnica utilizada.

Desarnaulds, Loerincik, e Carvalho (2001) efetuaram estudos acústicos em duas igrejas da Suíça e apresentam imagens da utilização de vasos de cerâmica. A Igreja de Villette com volume aproximado de 830 m^3 tem um coro que data dos séculos XIII e XIV e conta atualmente com quatro vasos acústicos todos instalados a 3,8 m (três metros e oitenta centímetros) de altura (Figura 2.12).

Figura 2.12 – Aberturas dos Vasos acústicos na Igreja de Villette, Suíça.
Fonte: DESARNAULDS, LOERINCIK e CARVALHO (2001)

Na Figura 2.13 apresenta-se um dos vasos acústicos que foram utilizados na Igreja de Villete. Este vaso foi encontrado em 1927 e hoje está exposto em um museu.

Figura 2.13 – Vaso acústico utilizado na Igreja de Villette encontrado em 1927.
Fonte: DESARNAULDS, LOERINCIK e CARVALHO (2001)

A Igreja de Syens tem volume aproximado de 990 m^3, uma nave que data de 1787 e um coro do século XIII. Por ocasião da restauração desta igreja em 1897 foram encontrados cinco vasos de cerâmica. Atualmente apenas quatro permanecem. Na Figura 2.14 observa-se o desenho de três dos vasos da Igreja de Syens (DESARNAULDS, LOERINCIK e CARVALHO, 2001).

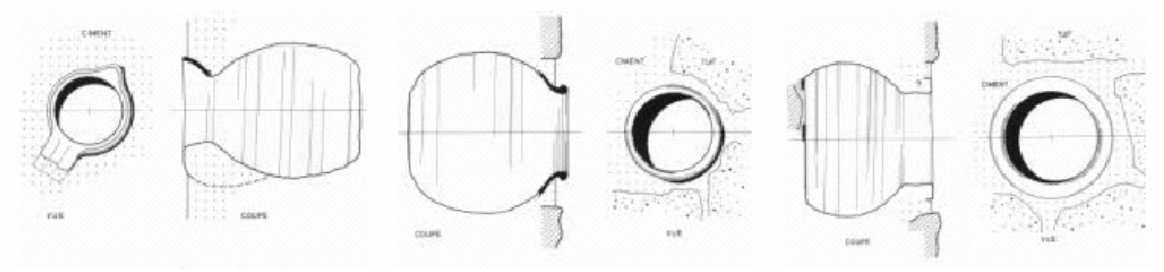


Figura 2.14 – Vasos acústicos da Igreja de Syens.
Fonte: DESARNAULDS, LOERINCIK e CARVALHO (2001)

Hermann Ludwing Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) foi quem primeiro executou experimentos com objetos esféricos, de tamanho graduado, com um pescoço e um buraco para aproximar do ouvido e escutar o resultado da experiência. Foi ele quem conseguiu estimar a energia para cada freqüência por meio da intensidade do som em diferentes ressoadores. A Figura 2.15 traz um dos desenhos referentes aos estudos de Hermann von Helmholtz, um ressoador de vidro. Esta ilustração faz parte do livro "On The Sensations of Tone - as a physiological basis for the Theory of Music" escrito por Helmholtz.

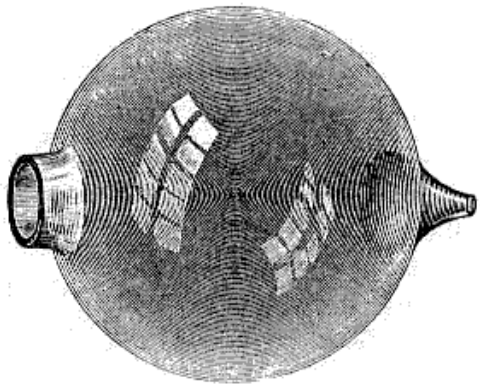


Figura 2.15 – Ressoador de vidro.
Fonte: HELMHOLTZ (1954 apud AUDIOLIST, 2008)

O conjunto de vinte e dois ressoadores de Helmholtz apresentado na Figura 2.16 faz parte do "Garland Collection of Classic Physics Apparatus" da Universidade de Vanderbilt nos Estados Unidos da América. Foram adquiridos pelo chanceler Garland para o desenvolvimento de pesquisa no Departamento de Física da mesma universidade quando ela foi aberta, em 1875.

Figura 2.16 – Ressoadores de Helmholtz – Garland Collection of Classis Physics Apparatus. Fonte: KENYON COLLEGE (2008)

O ressoador de Helmholtz é um sistema absorvedor baseado na propriedade de dissipar energia em torno de uma freqüência de ressonância a qual é função das características geométricas do sistema (SANTOS, 2005). Esta propriedade dos ressoadores será abordada em detalhes no item 3.5.

3 REVISÃO TEÓRICA

Neste capítulo far-se-á a exposição de noções de acústica, comportamento e características do som, origem e controle do ruído. Tais tópicos permitirão a compreensão do fenômeno acústico envolvido e facilitarão o entendimento dos capítulos subseqüentes.

3.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO SOM

Conforme Henrique (2002), a palavra acústica tem origem na palavra grega *akouein,* que significa ouvir; no entanto, hoje o seu significado transcende em muito os sons que ouvimos. Acústica é uma ciência, um ramo da física por meio do qual se investigam as vibrações mecânicas e os fenômenos ondulatórios em um meio material elástico. De forma simplificada, pode-se dizer que a acústica estuda o som desde sua geração, propagação até a recepção do sinal sonoro.

3.1.1 O ruído e o ser humano

O som é o efeito produzido por ondas mecânicas que se propagam através de um meio elástico e são capazes de sensibilizar o receptor. Segundo Bistafa (2006), o som é a sensação produzida no sistema auditivo, enquanto ruído é um som sem harmonia, geralmente de conotação negativa. Ainda segundo Bistafa, o som pode ser definido como uma variação da pressão ambiente detectável pelo sistema auditivo.

Corpos em vibração produzem regiões de compressão e rarefação do meio material, ou seja, produzem deformações do meio. São variações de pressão muito rápidas que só podem ser transmitidas através de um meio material. Deste fenômeno resultam as ondas sonoras. Levando em consideração este fato, pode-se afirmar que o som não se propaga no vácuo.

Portanto, ondas sonoras são o efeito combinado de compressão e rarefação das moléculas de ar, o que faz com que elas se movimentem para frente e para trás. Assim, as moléculas mais próximas da fonte transferem energia para as moléculas mais afastadas, até essa vibração atingir o ouvido (MAIA, 2002).

Bistafa (2006) lista uma seqüência de eventos que ocorrem após a geração de um som quando há alguém para escutá-lo: após ser gerado, o som se propaga até a aurícula e em seguida para o interior do conduto auditivo externo; reagindo à propagação sonora o

tímpano vibra e conseqüentemente os ossículos da orelha média também vibram; esta vibração faz com que ondas de pressão sejam transmitidas para o líquido presente no interior da cóclea sendo que esta codifica o som; o som codificado é transmitido ao cérebro via nervo auditivo.

Na Figura 3.1 podem-se observar alguns detalhes da anatomia do ouvido humano.

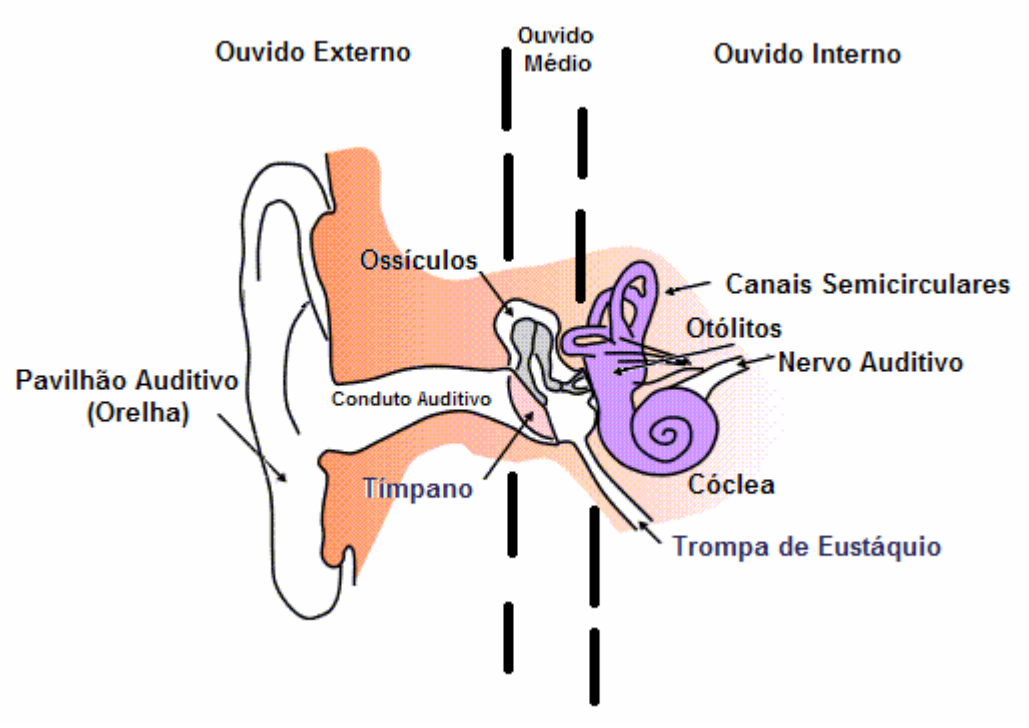


Figura 3.1 – Anatomia do ouvido humano

Fonte: WIKIPÉDIA (2007)

Existem três componentes básicos para que ocorra a sensação sonora:

- ✓ Um corpo capaz de vibrar com freqüência entre 20 Hz e 20.000Hz, a fonte sonora.
- ✓ Um meio material elástico entre a fonte sonora e o ouvido humano.
- ✓ Uma pressão sonora capaz de sensibilizar o ouvido humano.

O ouvido humano permite ouvir e interpretar o som através de processos complexos que ainda permanecem, em parte, desconhecidos e responde a uma larga faixa de freqüência sonora, desde o limiar da audição até o limiar da dor. O limite de freqüência entre 20 Hz e 20.000Hz diz respeito à faixa de freqüência que é capaz de sensibilizar o ouvido humano. Este limite não é rígido e varia de pessoa pra pessoa. Ondas cujas freqüências são menores que 20 Hz são ditas infra-sônicas; e ondas com freqüências maiores que 20.000 Hz são ultra-sônicas.

As células da cóclea, parte constituinte do aparelho auditivo, têm por função colher as vibrações e levá-las até o sistema nervoso. Se expostas por longo tempo a altos Níveis de Pressão Sonora são danificadas, causando assim a perda de audição e a redução da capacidade de entendimento na comunicação verbal.

Ruídos e vibrações podem causar, além de danos auditivos, reações maléficas ao organismo humano, entre as quais citam-se a aceleração da pulsação, o aumento da pressão sangüínea e o estreitamento dos vasos sangüíneos. A resposta do corpo humano ao campo de vibrações a que é submetido não ocorre somente de forma mecânica, mas também com efeitos psicológicos. Os danos provocados à saúde pelo ruído dependem da intensidade e do tempo de exposição aos quais as pessoas são submetidas.

3.1.2 Ondas sonoras

Maia (2002) define ondas sonoras como ondas mecânicas longitudinais, as quais podem propagar-se em meio sólido, líquido e gasoso. São mecânicas por necessitarem de um meio material para que ocorra sua propagação e, longitudinais, pois as partículas materiais responsáveis por sua transmissão oscilam paralelamente à direção de propagação.

Conforme já citado, as ondas sonoras são produzidas por corpos em vibração. Esta vibração é transmitida por meio de compressões e rarefações do ar até atingir o ouvido humano. Maia (2002) define frente de onda como o lugar geométrico onde as pressões são máximas. Na Figura 3.2 faz-se uma representação da propagação sonora no ar.

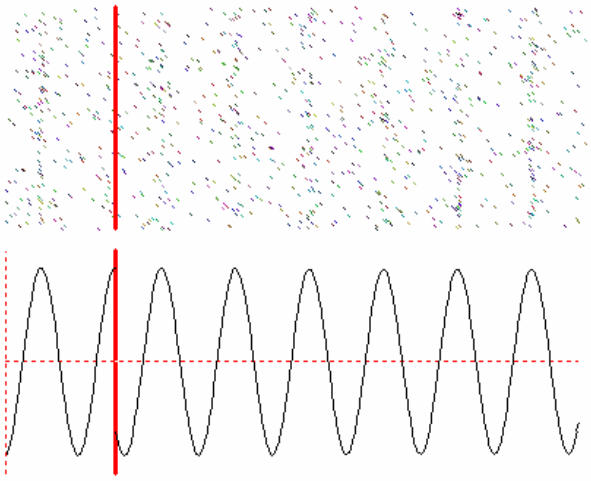


Figura 3.2 – Representação da propagação sonora no ar

Fonte: SQUARE ONE (2007)

3.1.3 Freqüência

Define-se a freqüência de um som da mesma forma que a freqüência de qualquer movimento periódico: pelo número de ciclos por segundo. Portanto, o efeito sonoro ocorre quando uma fonte vibratória causa flutuações no ar. Freqüência é a taxa de repetição dessas vibrações e é medida em Hertz (Hz), onde 1 Hz (um Hertz) equivale a um ciclo por segundo. A freqüência é um fator de importância nas medições acústicas.

Sons em uma única freqüência são chamados *tons puros*, como é o caso do som gerado pelo diapasão (MAIA, 2002). Os sons que se escuta no dia-a-dia são normalmente uma combinação de tons puros em diversas freqüências.

Instrumentos de medição acústica normalmente fornecem o espectro sonoro em bandas ou faixas de freqüência. A banda de freqüência é caracterizada pela sua largura que pode ser estreita ou larga e, esta última, constante ou variável. A *banda de oitava* é um espectro de banda larga de largura variável bastante utilizado, onde a largura da banda é aproximadamente 70% da freqüência central (BISTAFA, 2006). As freqüências centrais da banda de oitava padrão são 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000 e 8.000 Hz. Na Figura 3.3 observa-se um exemplo de espectro ruído em banda de oitava.

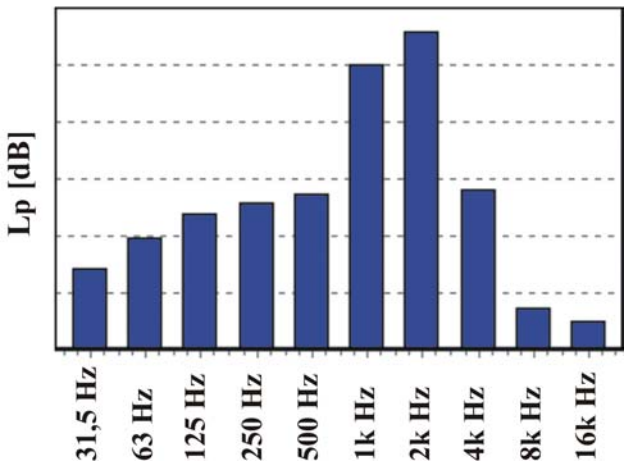


Figura 3.3 – Espectro de ruído em banda de oitava
Fonte: NOISE METERS (2007)

3.1.4 Comprimento de onda

De acordo com Henrique (2002), o som, a exemplo de todos os fenômenos que se propagam por movimentos ondulatórios, tem comprimento de onda. Comprimento de onda, segundo Bistafa (2006), é a distância, a partir de qualquer valor de pressão sonora,

na qual um ciclo se completa na curva de pressão sonora versus distância. Na Figura 3.4 faz-se a ilustração do comprimento de onda de duas ondas de diferentes freqüências.

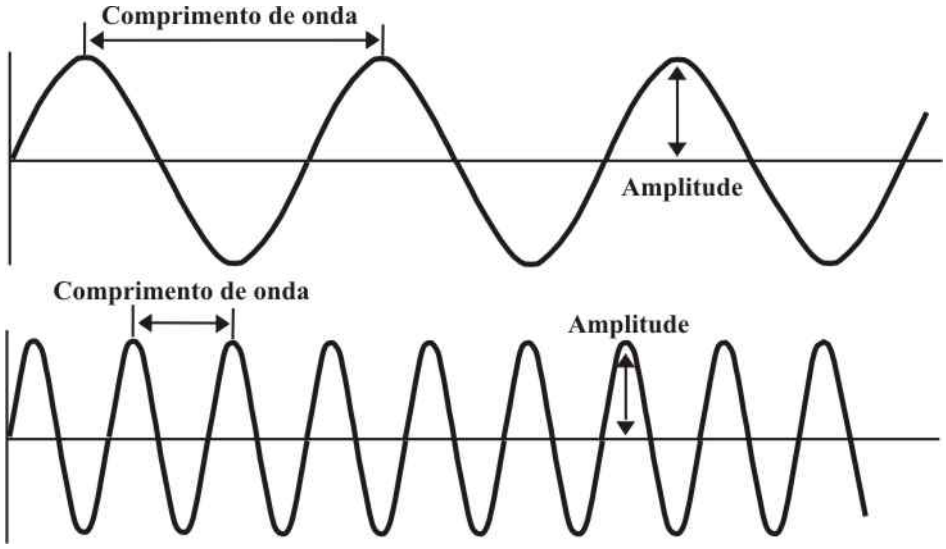


Figura 3.4 – Comprimento de onda de ondas de diferentes freqüências
Fonte: KNIRSCH (2007)

Observa-se na Figura 3.4 que o comprimento de onda da onda superior é três vezes maior que o comprimento de onda da onda inferior, mas a sua freqüência equivale a um terço da freqüência da onda inferior, tendo as duas ondas a mesma amplitude (KNIRSCH, 2007).

O comprimento de onda é representado pela letra grega lambda (λ) e é relacionado com a freqüência através da velocidade do som no meio, conforme a Equação 3.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \qquad \text{(Eq. 3.1)}$$

onde:

"c" é a velocidade do som [m],

"f" é a freqüência [Hz].

Fazendo uma análise da Equação 3.1, observa-se que o comprimento de onda é inversamente proporcional à freqüência de propagação da onda. A partir deste fato, pode-se concluir que, sons graves, os quais possuem baixas freqüências, têm grandes comprimentos de onda; e, sons agudos, os quais possuem altas freqüências, têm pequenos comprimentos de onda, o que já foi observado na análise da Figura 3.4. Como exemplo citam-se sons de 125 e 4.000 Hz que, têm comprimentos de onda respectivamente iguais a 2,72 e 0,17 metros, considerando a velocidade do som igual a 340 m/s.

3.1.5 Velocidade de propagação do som

Os sons, em sua maioria, chegam ao ouvido transmitidos pelo ar, o qual age como meio de transmissão. A propagação do som não é instantânea. A velocidade do som é muito menor que a velocidade da luz e depende das propriedades físicas do meio.

Pode-se verificar esse fato durante as tempestades: o trovão chega ao ouvido segundos depois do relâmpago, embora ambos os fenômenos (relâmpago e trovão) se formem ao mesmo tempo.

Nas pequenas altitudes os sons são bem audíveis, o que não ocorre em altitudes maiores, onde o ar é menos denso. O ar denso é melhor transmissor do som que o ar rarefeito, pois as moléculas gasosas estão mais próximas e transmitem a energia cinética da onda de umas para as outras com maior facilidade.

Os sons não se transmitem no vácuo, porque exigem um meio material para sua propagação. De maneira geral, os sólidos transmitem o som melhor que os líquidos, e estes, melhor do que os gases.

Conforme Benade (1990 apud HENRIQUE, 2002) e Benson (1996 apud HENRIQUE, 2002), a velocidade de propagação de uma onda mecânica através de um meio é uma expressão da forma apresentada na Equação 3.2.

$$Velocidade\ da\ onda = \sqrt{\frac{Coeficiente\ de\ elasticidade\ do\ meio}{Coeficiente\ de\ inércia\ do\ meio}} \qquad \text{(Eq. 3.2)}$$

Considerando que as propriedades do ar são representadas por valores fixos, Henrique (2002) escreve a Equação 3.3 para o cálculo da velocidade de propagação do som no ar em função da temperatura deste.

$$c = 20{,}1\sqrt{T} \qquad \text{(Eq. 3.3)}$$

onde:

"c" é a velocidade do som [m],

"T" é a temperatura do ar [K].

Na Tabela 3.1 apresentam-se alguns valores da velocidade de propagação do som no ar de acordo com a variação da temperatura. Estes valores foram calculados pela aplicação da Equação 3.3. Considerou-se a temperatura em *Kelvin* dada pela Equação 3.4 (HENRIQUE, 2002).

$$K = {}^{o}C + 273{,}15 \qquad \text{(Eq. 3.4)}$$

onde:

"K" é a temperatura em *Kelvin*,

"ºC" é a temperatura em graus *Celsius*.

Tabela 3.1 – Velocidade de propagação do som no ar de acordo com a variação da temperatura

Temperatura [ºC]	Velocidade (m/s)
10	338
15	341
20	344
25	341
30	347

3.1.6 Unidade de medida do som

A medida usada para calcular a intensidade dos sons é o Nível de Pressão Sonora, NPS ou SPL (*sound pressure level*), expresso em "decibels"[1]. Esta medida retrata a quantidade de energia existente na onda sonora.

Segundo Seep (2002), decibels não são unidades que se relacionam linearmente com uma grandeza. Decibels têm a característica de comprimir uma ampla faixa de variação da escala linear de potências por transformação desta em escala logarítmica. Desta forma o som de dois decibels é dez vezes mais intenso que o som de um decibel (SOARES, 2003). A Figura 3.5 ilustra como a escala logarítmica é capaz de comprimir uma ampla faixa de freqüências em apenas duas ordens de grandeza.

[1] Em linguagem coloquial emprega-se também "decibéis".

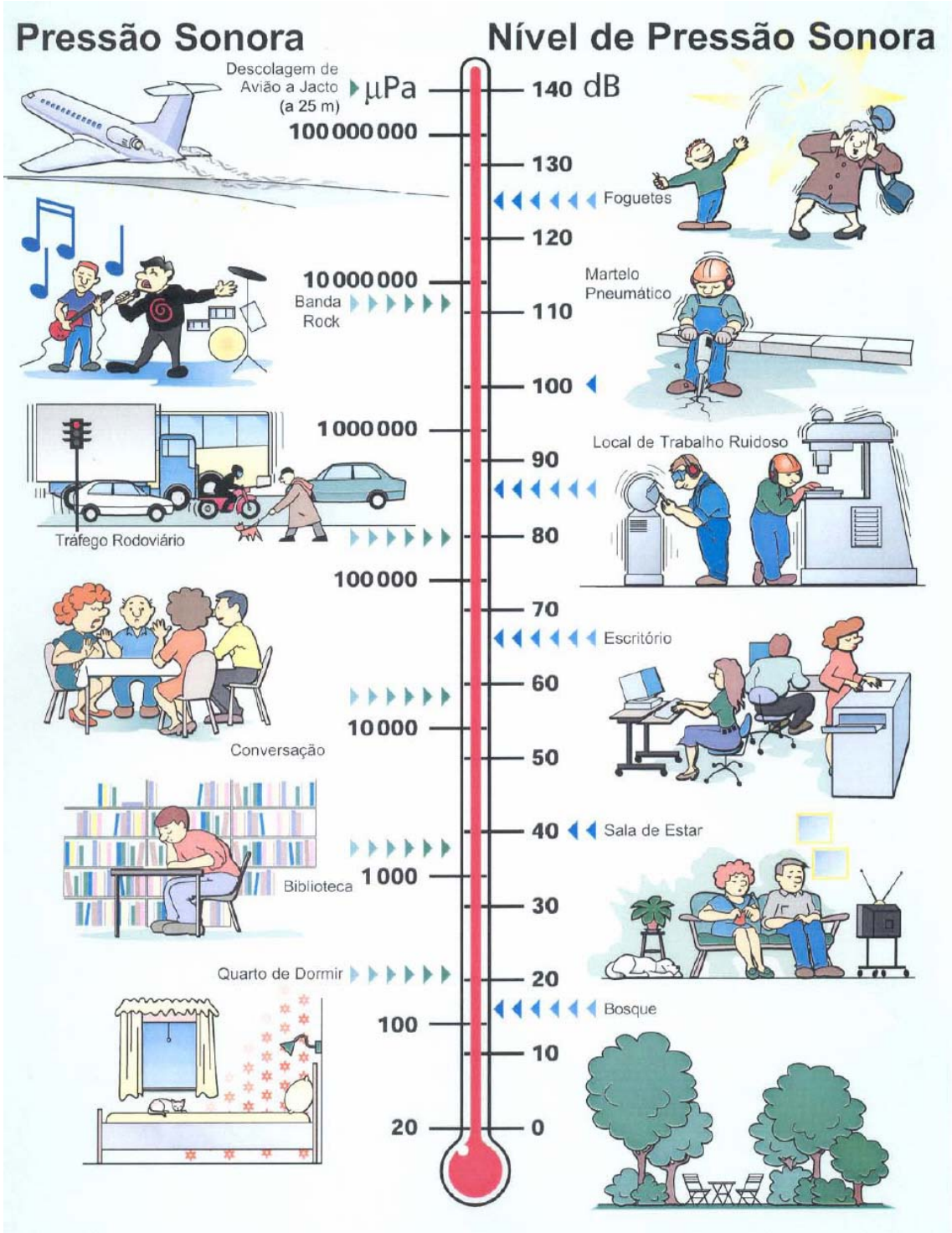


Figura 3.5 – Escala linear versus escala logarítmica

Fonte: BRÜEL & KJÆR (2007)

Conforme Bistafa (2006), o que se faz é uma medida do nível da potência em relação a uma potência de referência. Henrique (2002) traz a Equação 3.5 como uma definição do decibel.

$$D = M \log_b \frac{A}{A_0} \qquad \text{(Eq. 3.5)}$$

onde:

"D" significa *decibel*,

"M" representa um fator multiplicativo (10 ou 20),

"b" é a base do logaritmo considerado,

"A" é a grandeza medida,

"A_0" é uma quantidade de referência da grandeza A.

Com a utilização de escalas logarítmicas, além de permitir-se a representação de valores de grandezas com grandes variações de amplitude conforme já citado, considera-se também uma particularidade do ouvido humano, cuja resposta às perturbações acústicas é do tipo logarítmica e não-linear (HENRIQUE, 2002).

Ainda de acordo com Henrique (2002), a variação do fator M deve-se à necessidade de compatibilizar as expressões de base na definição de decibel, relacionadas com a *energia* (fator M=10), com as definições baseadas na amplitude de grandezas físicas "elementares", tais como a pressão *p* (fator M=20). Apresentam-se, na Tabela 3.2, os principais níveis de grandezas acústicas.

Tabela 3.2 – Principais níveis de grandezas acústicas
Fonte: Adaptado de HENRIQUE (2002)

Designação	Definição	Valores de referência
Nível de Intensidade Sonora – L_I	$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}$	$I_0 = 10^{-12} Wm^{-2}$
Nível de Potência Sonora – L_w	$L_W = 10 \log \frac{P}{P_0}$	$P_0 = 10^{-12} W$
Nível de Pressão Sonora – L_p	$L_p = 10 \log \frac{p}{p_0}$	$p_0 = 2x10^{-5} Nm^{-2}$

onde:

"I" é a intensidade sonora [W/m^2],

"I_0" é a intensidade sonora de referência [W/m^2],

"P" é a potência sonora [W],

"P_0" é a potência sonora de referência [W],

"p" é a pressão sonora [N/m^2],

"p_0" é a pressão sonora de referência [N/m^2].

O limite inferior de captação do som para os ouvidos humanos, limiar da audibilidade, para a freqüência de 1.000 Hz corresponde a uma amplitude de pressão sonora de 20μPa, valor este que é tomado como valor de referência para o cálculo do Nível de Pressão Sonora (Tabela 3.2). Expressa em valores de pressão, a pressão sonora que corresponde ao limiar da dor é um milhão de vezes superior à do limiar de audibilidade, ou seja, 20Pa (120 dB) (HENRIQUE, 2002).

Um medidor simples de Nível de Pressão Sonora fornece o NPS global em dB, onde estão combinados os níveis de pressão sonora em todas as freqüências. Outros medidores podem ter filtros que permitem medir o NPS em cada banda de oitava. É possível também ponderar o NPS ajustando o nível em freqüências diferentes antes de combinar os níveis em um nível global. Um exemplo desta aplicação é a ponderação "A" que reduz o nível de som de forma a simular a sensibilidade do ouvido humano. Os valores desta ponderação são indicados em dB(A).

Calcular o NPS produzido por duas fontes simultaneamente não significa simplesmente adicionar seus níveis individuais em decibels. Como exemplo pode-se citar duas pessoas conversando, cada uma gerando 60 dB(A). Para calcular o NPS resultante aplica-se a Equação 3.6 mencionada em Soares (2003).

$$NPS_R = 10\log\left[10^{\frac{x_1}{10}} + 10^{\frac{x_2}{10}}\right] \qquad \text{(Eq. 3.6)}$$

onde:

"NPS_R" é o Nível de Pressão Sonora resultante,

"x_i" são os Níveis de Pressão Sonora a serem somados.

Portando,

$$NPS_R = 10\log\left[10^{\frac{60}{10}} + 10^{\frac{60}{10}}\right] \Rightarrow NPS_R = 63dB(A)$$

Se um som é muito mais intenso que o outro, o som menos intenso será mascarado, sendo o nível combinado em decibels igual ao nível do som mais intenso. Se os dois são igualmente intensos, então o nível combinado é 3 dB maior que o nível gerado individualmente pelas duas fontes.

3.1.7 Altura, intensidade e timbre

Uma onda sonora apresenta algumas particularidades que permitem melhor caracterizá-la. Portanto pode-se distinguir em um som a altura, a intensidade e o timbre. Segundo Henrique (2002) essa classificação não é rigorosa, pois envolve características psicológicas (altura e timbre) com físicas (intensidade).

A altura permite diferenciar um som grave de um agudo. Esta diferenciação se dá por meio da freqüência com que o som se propaga. Baixas freqüências permitem que se escute um som grave, enquanto altas freqüências geram um som agudo.

A intensidade sonora corresponde à energia da onda, ou seja, à sua potência. Associa-se a intensidade sonora à amplitude da onda: quanto maior a amplitude da onda, maior a intensidade.

Timbre é a característica que permite distinguir sons de mesma altura e intensidade, porém emitidos por fontes distintas. Está diretamente associado à forma da onda, ou seja, está relacionado com a maneira de vibrar da fonte sonora.

3.2 RUÍDO OCASIONADO PELO TRÁFEGO URBANO

A contaminação sonora é um problema ambiental que se encontra em constante crescimento. Este ocorre paralelamente ao crescimento da população e à urbanização. Estima-se que no período entre os anos de 1996 a 2010 ter-se-á um crescimento de 100% no transporte de cargas (VIRO, 2002).

Nos espaços urbanos, devido à elevada densidade populacional, existe uma maior sensibilidade ao ruído. A malha urbana é servida por uma rede complexa de comunicação viária, a qual constitui uma fonte constante de perturbação dos níveis sonoros do ambiente. Sobretudo após a revolução industrial, verificou-se uma elevada concentração de

atividades sociais, econômicas e dos meios de transporte, transformando os espaços urbanos em espaços de vivência onde o ruído faz-se onipresente (CML, 2007).

Paz, Ferreira e Zannin (2005) apontam, em um estudo intitulado "Estudo comparativo da percepção do ruído urbano" que, o ruído oriundo do tráfego de veículos é indicado pela população como o tipo de ruído que causa maior incômodo. As exigências de qualidade de vida requerem intervenções na malha urbana, de forma a reduzir os níveis de ruído, o que não é uma tarefa simples. Necessita-se de ferramentas para o ordenamento e planejamento urbano e para o desenvolvimento de estratégias de intervenção.

Conforme Viro (2002), o ruído provocado por um veículo em circulação resulta da sobreposição de vários ruídos vindos de diferentes partes do veículo, como motor e pneus. O ruído presente em uma via normalmente é produzido por diversos veículos com diferentes posições, velocidades e acelerações. Desta forma, qualquer estudo realizado com base em dados desta natureza terá um caráter estatístico.

Além disso, Josse (1975) salienta que uma fonte de ruído como um automóvel não produz somente sons em uma única freqüência e sim um ruído de espectro extenso de freqüências. Conforme citado em Viana (2006), o ruído de tráfego tem, como principais componentes, sons de baixa freqüência.

3.3 PROPAGAÇÃO SONORA AO AR LIVRE

Tratando-se da propagação sonora ao ar livre entram em pauta três pontos de interesse: a fonte sonora, a trajetória de transmissão e o receptor.

Conforme Bistafa (2006), tem-se primeiramente a emissão de determinada potência sonora na fonte, gerando um determinado nível de pressão sonora medido no seu entorno. A partir disso tem-se a propagação sonora entre a fonte e o receptor com a atenuação do nível de pressão sonora ao longo da trajetória. Esta atenuação deve-se a inúmeros mecanismos, entre os quais podem-se citar a absorção sonora do ar atmosférico, reflexões e absorção no solo, barreiras acústicas naturais ou artificiais, gradientes verticais de vento e temperatura e o próprio distanciamento do receptor em relação à fonte (Figura 3.6).

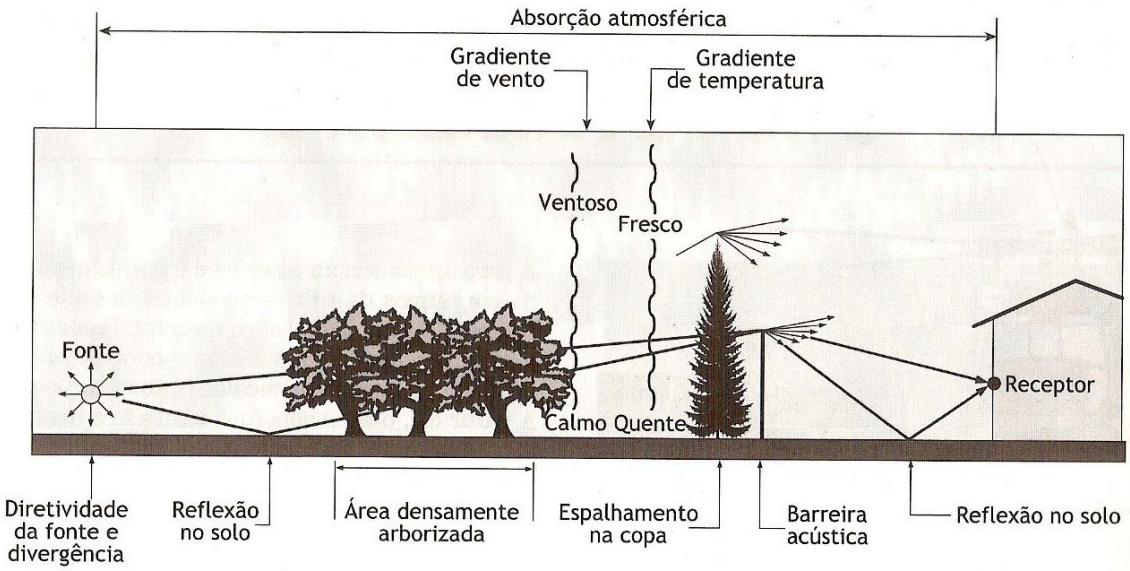


Figura 3.6 – Mecanismos mais significativos da atenuação sonora ao ar livre
Fonte: ANDERSON E KURZE (1992 apud BISTAFA, 2006)

É de difícil estimativa o resultado da combinação de todos os efeitos que se sobrepõem durante a propagação da onda sonora. Portanto, neste trabalho, já que o foco central é o estudo de barreiras acústicas artificiais e que se utilizarão valores comparativos, opta-se por trabalhar de forma aproximada com a perda na inserção da barreira, desconsiderando o efeito dos outros agentes atenuadores.

3.3.1 Controle do ruído

Controle do Ruído são medidas que se devem tomar no sentido de atenuar o efeito do ruído sobre as pessoas. Controle não significa supressão da causa, mas sim, uma manipulação do efeito (BERANEK, 1960; GERGES, 2000).

De um modo geral, o controle do ruído pode ser executado tomando-se as seguintes medidas (FERNANDES, 2002): controle do ruído na fonte, no meio de propagação e no receptor.

Para o caso específico deste estudo, onde o ruído é originado pelo tráfego urbano, torna-se inviável o controle na fonte devido à sua natureza. O controle no receptor é dificultado por caracterizar a utilização de protetores auriculares em uma instituição de ensino, já que o estudo foi realizado em área do campus sede da Universidade Estadual de Maringá. Por eliminação o controle de ruído no meio de propagação é a alternativa mais adequada.

3.3.2 Barreiras acústicas

Conforme Godinho, António e Tadeu (2001) uma solução amplamente empregada para tentar resolver problemas de ruído gerado pelo tráfego de veículos é o uso de barreiras acústicas. Muitos pesquisadores hoje se dedicam ao estudo da real eficiência destas barreiras.

Bertulani (2004) define barreiras acústicas como dispositivos de massa e altura mínimas necessárias instalados entre a(s) fonte(s) de som e o receptor, de forma a provocar uma redução do Nível de Pressão Sonora por meio da difração.

Uma outra definição é apontada por Bistafa (2006), que caracteriza barreira acústica como qualquer estrutura ou obstáculo que impeça a visão da fonte pelo receptor, inclusive o próprio solo quando este se eleva interferindo com a linha de visão.

Conforme estas definições, o mecanismo de redução do ruído com a utilização de barreiras acústicas baseia-se no fato de obstruir-se a linha de visão entre fonte e receptor. De acordo com Klingner, McNerney, Busch-Vishniac (2003), ao obstruir o trajeto da onda sonora, permite-se uma redução de aproximadamente 5dB. No entanto, ao construir-se barreiras mais altas, faz-se com que o som percorra uma trajetória maior antes de atingir o receptor e, desta forma, pode-se chegar a uma atenuação adicional de pelo menos 3dB.

Segundo FHWA (2001), barreiras acústicas eficazes reduzem os níveis de ruído em torno de 5 à 10 decibels, o que reduz o ruído do tráfego aproximadamente pela metade.

Quando um obstáculo é posicionado na trajetória de avanço de uma onda sonora, esta onda, ao entrar em contato com o obstáculo, estará sujeita a fragmentar-se em várias parcelas. Esta condição é ilustrada na Figura 3.7.

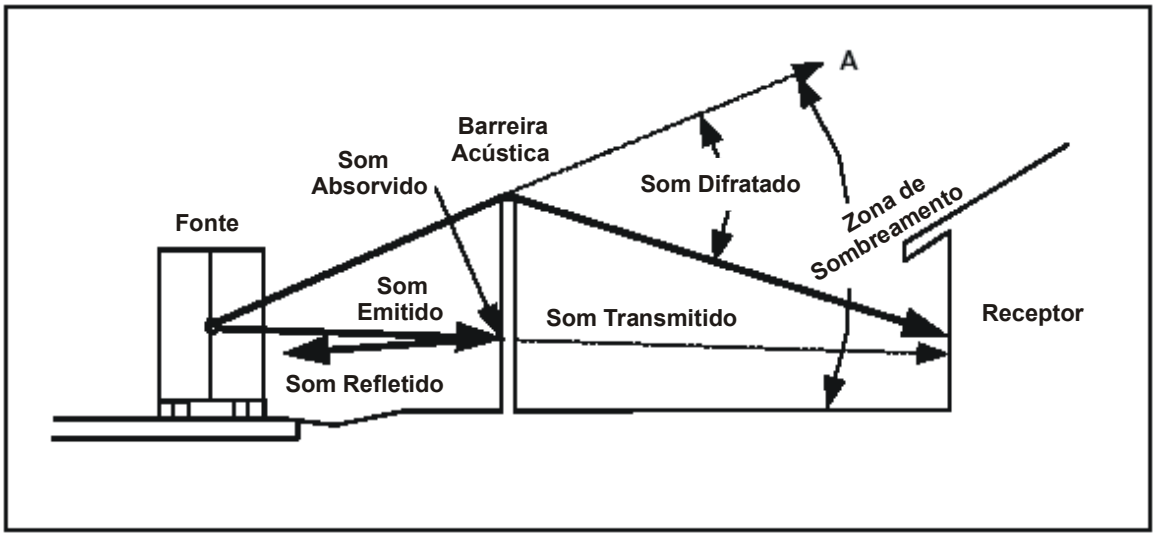


Figura 3.7 – Esquema da Divisão do Som ao Encontrar um Obstáculo

Fonte: Adaptado de HENDRIKS (1998)

Em barreiras acústicas de grande extensão a difração sonora nas bordas laterais da barreira não afeta o nível sonoro no receptor. Nestes casos o som que atinge o receptor é aquele que, a partir da fonte, posicionada na frente da barreira, atinge o topo desta, sendo então curvado por difração para baixo, gerando uma zona de sombra acústica atrás da barreira, ou seja, na face da barreira oposta à geração do ruído (BISTAFA, 2006). Na Figura 3.7, anteriormente apresentada, pode-se observar esta zona de sombreamento, na qual é provável e espera-se que ocorra uma redução do NPS medido, principalmente nas freqüências mais altas, sendo este fato relacionado com a geometria da barreira acústica.

Segundo Bistafa (2006), a atenuação do nível sonoro por difração, combinada com a redução proporcionada pelo solo é denominada *perda na inserção* ("insertion loss", IL) da barreira. Este tópico será abordado em momento oportuno.

Discorre-se a seguir sobre os fenômenos físicos que promovem a fragmentação da onda sonora: reflexão, absorção e transmissão. Sobre a difração falar-se-á separadamente.

Reflexão

Quando durante a propagação de uma onda sonora, esta incide sobre uma superfície sólida de grandes dimensões em relação ao comprimento de onda, tal superfície funcionará como um obstáculo à sua propagação. A onda sonora será refletida e esta reflexão ocorrerá de acordo com as leis da reflexão ótica onde a reflexão proporcionada por uma superfície é diretamente proporcional à dureza do material que compõe tal superfície. Portanto pode-se dizer que a onda sonora reflete-se como se fosse originada numa fonte sonora *imagem*

situada a uma distância da superfície refletora igual à distância da fonte real (HENRIQUE, 2002). Paredes de concreto, mármore, azulejos e vidro refletem quase 100% do som incidente (BERTULANI, 2004).

Conforme Henrique (2002) se os obstáculos forem muito menores do que o comprimento de onda da onda incidente, não afetarão praticamente nada a propagação da onda, criarão apenas uma *sombra acústica*.

Bistafa (2006) define o coeficiente de reflexão sonora, representado pela letra grega rô (ρ), conforme a Equação 3.7.

$$\rho = \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \qquad \text{(Eq. 3.7)}$$

onde:

"ρ" é o coeficiente de reflexão sonora,

"$I_{refletida}$" é a intensidade sonora do som refletido,

"$I_{incidente}$" é a intensidade sonora do som incidente.

Absorção

Alguns materiais são capazes de não permitir que o som seja refletido pela superfície que compõem. A esta propriedade dá-se o nome de absorção, que é representada pela letra grega alfa (α). Conforme Bistafa (2006), a intensidade sonora absorvida degrada-se em calor no meio material que compõe a superfície. Em materiais porosos e fibrosos, os quais são comumente empregados como absorvedores, a absorção se dá essencialmente pela dissipação da energia sonora por atrito, devido ao movimento das moléculas do ar no interior do material por ocasião da passagem da onda sonora. A dissipação de energia sonora por materiais absorventes depende fundamentalmente da freqüência do som como é possível observar na Figura 3.8.

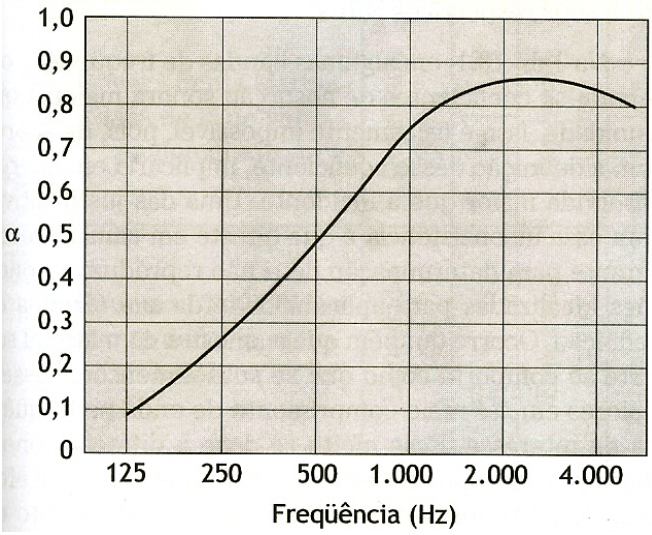


Figura 3.8 – Variação do coeficiente de absorção sonora de materiais absorventes porosos e fibrosos segundo a freqüência

Fonte: GONZALEZ (1980 apud BISTAFA, 2006)

O som absorvido por uma superfície é a quantidade de som dissipado mais a quantidade de som transmitido (BERTULANI, 2004).

A capacidade de uma superfície em absorver o som é dada pelo coeficiente de absorção sonora definido conforme Bistafa (2006) pela Equação 3.8.

$$\alpha = \frac{I_{absorvida}}{I_{incidente}} = \frac{I_{incidente} - I_{refletida}}{I_{incidente}} = 1 - \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \qquad \text{(Eq. 3.8)}$$

onde:

"α" é o coeficiente de absorção sonora,

"$I_{absorvida}$" é a intensidade sonora absorvida,

"$I_{refletida}$" é a intensidade sonora do som refletido,

"$I_{incidente}$" é a intensidade sonora do som incidente.

O coeficiente de absorção sonora pode ser obtido experimentalmente em uma câmara reverberante e é denominado Sabine. Seu valor varia entre 0 e 1, sendo que, quando α = 1 tem-se toda energia absorvida e, quando α = 0 toda a energia é refletida (HENRIQUE, 2002).

Conforme observado na Figura 3.8, materiais fibrosos e porosos normalmente são bons absorvedores de sons de alta freqüência. Caso seja necessário melhorar a absorção de sons

de baixa freqüência faz-se necessário o emprego de dispositivos especializados de absorção sonora. Como exemplo destes dispositivos cita-se o ressoador de Helmholtz, sobre o qual falar-se-á em tópico específico.

Transmissão

Ao ser atingida por uma onda sonora uma superfície pode passar a vibrar e, desta forma, transforma-se em uma fonte sonora. Este fenômeno recebe o nome de transmissão. Segundo Bertulani (2004), a transmissão é definida como a propriedade sonora que permite que o som passe de um lado para o outro de uma superfície continuando sua propagação. Quanto mais rígida e densa for a superfície menor será a energia transmitida.

O coeficiente de transmissão sonora é representado pela letra grega tau (τ) e definido conforme a Equação 3.9.

$$\tau = \frac{I_{transmitida}}{I_{incidente}} \qquad \text{(Eq. 3.9)}$$

onde:

"τ" é o coeficiente de transmissão sonora,

"$I_{transmitida}$" é a intensidade sonora transmitida,

"$I_{incidente}$" é a intensidade sonora do som incidente.

3.3.3 A difração

Os obstáculos podem provocar distorção das frentes de onda na propagação do som, fenômeno este denominado difração (MORFEY, 2001 apud HENRIQUE, 2002). Desta forma pode-se definir difração como a capacidade que o som e todos os outros tipos de ondas têm de contornar obstáculos, ou seja, a curvatura que uma onda faz ao passar por um obstáculo. Dependendo da forma e das dimensões do obstáculo a ser transpassado, esta curvatura vai ocorrer em maior ou menor grau.

A difração, assim como a reflexão e a absorção, depende da relação entre o comprimento de onda e o tamanho do obstáculo. Segundo Henrique (2002), se o comprimento de onda for menor que o comprimento do obstáculo poderão ocorrer os fenômenos de reflexão e absorção. Já, se o comprimento de onda for maior ou aproximadamente igual ao tamanho do obstáculo, é provável que ocorra a difração.

Também se entende por difração a capacidade das ondas de passar por pequenos orifícios em relação ao comprimento de onda. Faz-se referência ao comprimento de onda, pois este pode variar de alguns centímetros a vários metros, sendo considerado grande ou pequeno de acordo com o tamanho dos obstáculos encontrados no percurso da onda sonora.

Na Figura 3.9 pode-se observar o efeito da difração em uma onda por ocasião de sua passagem por um pequeno orifício. A ilustração é feita em um tanque cheio de água onde a difração ocorre de forma análoga ao que ocorre em um meio gasoso.

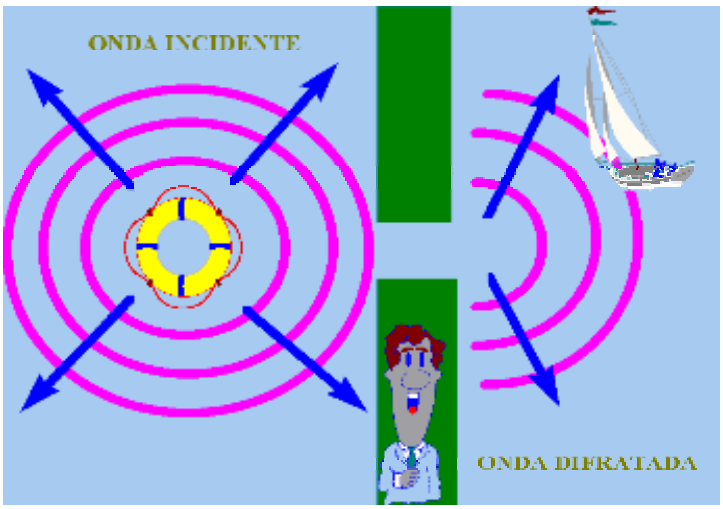


Figura 3.9 – Onda difratada em um pequeno orifício
Fonte: BERTULANI (2004)

Observa-se na Figura 3.9 que as ondas originárias propagam-se na superfície do tanque e incidem em um obstáculo com um orifício. O orifício funciona como uma nova fonte geradora, produzindo novas ondas.

Ressalta-se que a difração acontece quando as ondas sonoras encontram um objeto que impede sua livre passagem, sendo desta forma criada uma sombra em sua irradiação. As ondas têm a habilidade de se reconstituir após a passagem por um obstáculo e continuar se propagando por difração (LAZZARINI, 1998). Conforme já mencionado, o grau de difração do som depende do comprimento de onda e, portanto, da sua freqüência. Sons mais graves têm maior comprimento de onda e maior capacidade de difração. Pode-se então afirmar que sons agudos tendem a ser direcionais, enquanto sons graves espalham-se com maior facilidade. As Figuras 3.10, 3.11 e 3.12 mostram, respectivamente, a difração em um canto, através de uma abertura e em volta de um objeto, fazendo uma comparação entre o comportamento de ondas de baixas e altas freqüências, sendo seus comprimentos grandes e pequenos em relação aos obstáculos.

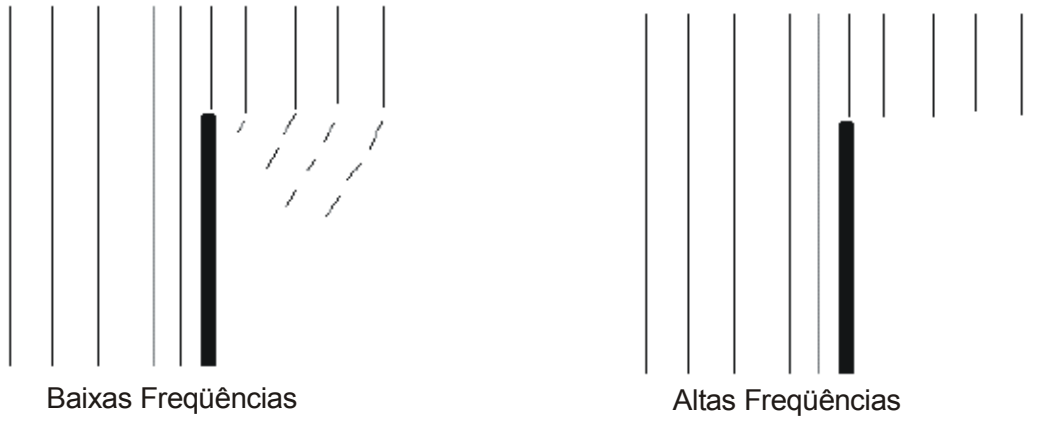


Figura 3.10 – Difração em um canto do obstáculo

Fonte: LAZZARINI (1998)

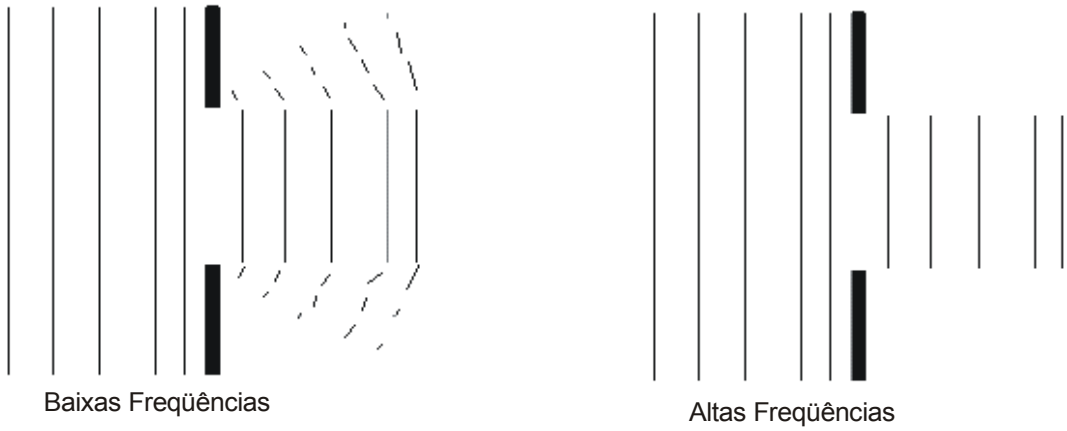


Figura 3.11 – Difração através de uma abertura em um obstáculo

Fonte: LAZZARINI (1998)

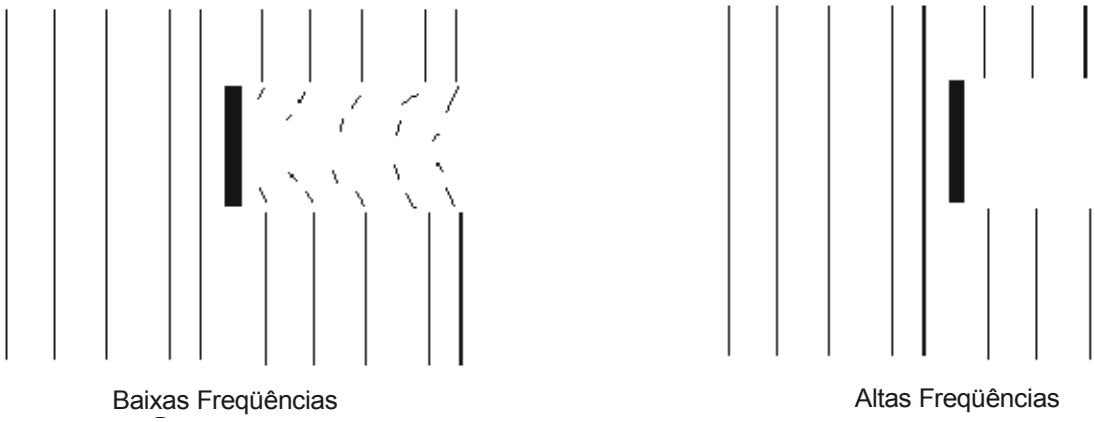


Figura 3.12 – Difração em volta de um objeto

Fonte: LAZZARINI (1998)

Com base nas propriedades das ondas discutidas até este momento e nos princípios ilustrados nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12, Hendriks (1998) faz três afirmações:

- ✓ O fenômeno da difração depende de três pontos críticos: a fonte, o topo da barreira e o receptor.
- ✓ Para uma determinada fonte, topo de barreira e disposição de receptores, uma barreira é mais efetiva na atenuação de freqüências mais altas que de freqüências mais baixas (Figura 3.13).
- ✓ Quanto maior o ângulo de difração, maior é a atenuação.

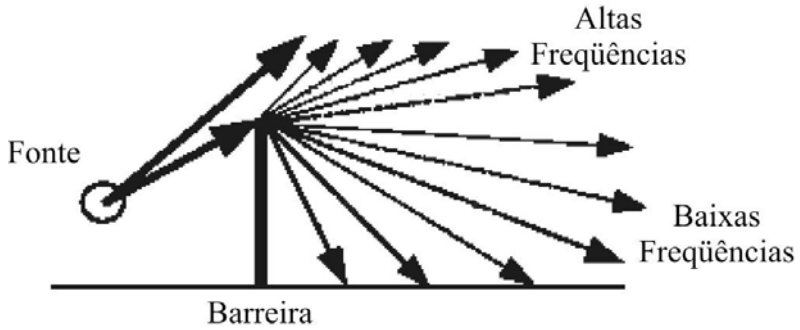


Figura 3.13 – Difração de ondas sonoras
Fonte: Adaptado de HENDRIKS (1998)

3.4 PERDA NA INSERÇÃO DA BARREIRA

Conforme Klingner, McNerney, Busch-Vishniac (2003), supondo que uma barreira acústica é suficientemente densa para bloquear praticamente todo o som que nela incide, não permitindo que este a atravesse, configura-se uma situação onde a onda sonora deve percorrer um caminho mais longo sobre ou em torno da barreira. A perda de som que ocorre é denominada *perda na inserção* e é obtida pela diferença entre o nível sonoro medido na ausência de barreira e o nível sonoro resultante após a inserção da barreira entre fonte sonora e receptor.

Na Tabela 3.3 apresentam-se os efeitos causados por diferentes níveis da perda na inserção.

Tabela 3.3 – Efeitos dos diferentes níveis da perda na inserção

Fonte: Adaptado de KLINGNER, MCNERNEY, BUSCH-VISHNIAC (2003)

Diminuição do nível sonoro	Relação correspondente de intensidade sonora	Relação correspondente de ruído percebido	Observações
10dB	um décimo	metade	Um décimo do volume de tráfego no período
6dB	um quarto	-	Dobro da distância da fonte pontual
4dB	-	-	Dobro da distância em relação ao tráfego de veículos (considerando reflexões)
3dB	metade	-	Metade do volume de tráfego
2dB	-	-	Menor diferença perceptível

O cálculo da perda na inserção será aqui apresentado de acordo com os experimentos realizados por Maekawa e as formulações apresentadas por Kurze e Anderson.

De acordo com Ferreira Neto (2002), no desenvolvimento dos cálculos da atenuação por difração, Maekawa aplicou a teoria da difração de Fresnel-Kirchhoff e obteve empiricamente um gráfico da atenuação em função do número de Fresnel. Conforme Li e Wong (2005), o número de Fresnel é a relação entre a diferença de caminho percorrido pela onda sonora (diferença entre a distância em linha reta entre a fonte e o receptor e a distância percorrida pela onda difratada, ou seja, a distância da fonte sonora até o topo da barreira somada à distância do topo da barreira até o receptor) e metade do comprimento de onda. Na Figura 3.14 ilustram-se as variáveis utilizadas no cálculo do número de Fresnel. A diferença de caminho percorrido pela onda sonora é dada pela Equação 3.10 e, o número de Fresnel, que é adimensional, pela Equação 3.11.

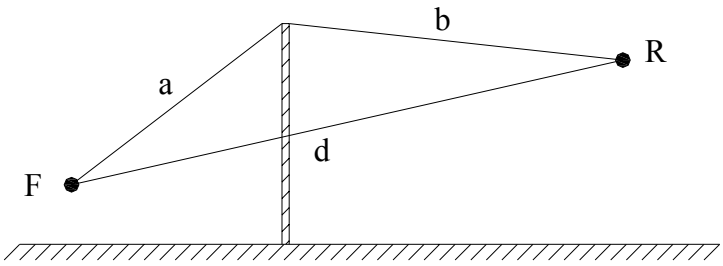


Figura 3.14 – Ilustração da barreira na trajetória do ruído

Fonte: JOSSE (1975)

$$\delta = (a + b) - d \qquad \text{(Eq. 3.10)}$$

onde:

"δ" é a diferença de caminho percorrido pela onda sonora [m],

"a" é a distância entre a fonte e o topo da barreira [m],

"b" é a distância entre o topo da barreira e o receptor [m],

"d" é a distância em linha reta da fonte até o receptor [m].

$$N = \frac{2 * \delta}{\lambda} \qquad \text{(Eq. 3.11)}$$

onde:

"λ" o comprimento de onda [m],

Kurze e Anderson (1971 apud KLINGNER, MCNERNEY, BUSCH-VISHNIAC, 2003), apresentam a Equação 3.12 para a estimativa da perda na inserção.

$$IL = 5dB + 20\log\left(\frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh\sqrt{2\pi N}}\right) \qquad \text{(Eq. 3.12)}$$

onde:

"IL" é a perda na inserção [dB],

"N" é a número de Fresnel [adimensional].

A Equação 3.12 é válida para N menor ou igual a 12,5. Quando N é maior que 12,5 a perda na inserção é de 20dB.

A Figura 3.15 apresenta as curvas obtidas a partir da Equação 3.12 e de dados empíricos.

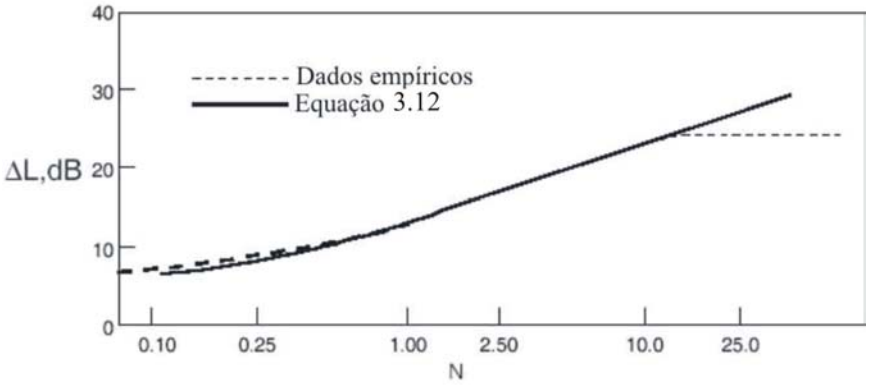


Figura 3.15 – Perda na inserção versus número de Fresnel para dados experimentais e empíricos

Fonte: Adaptado de KLINGNER, MCNERNEY, BUSCH-VISHNIAC (2003)

Apresenta-se a seguir o exemplo de estimativa da perda na inserção efetuado por Klingner, McNerney, Busch-Vishniac (2003). A situação de cálculo é ilustrada na Figura 3.16, sem escala, onde a barreira acústica tem 3,60m de altura e está a 3,60m da fonte sonora. Há uma casa posicionada no lado da barreira oposto ao da geração do ruído a uma distância de 4,50m da barreira acústica. A casa tem uma janela a uma altura de 1,20m. Nesta figura, "a", "b" e "c" são as distâncias representadas na Figura 3.14 e utilizadas na solução da Equação 3.10.

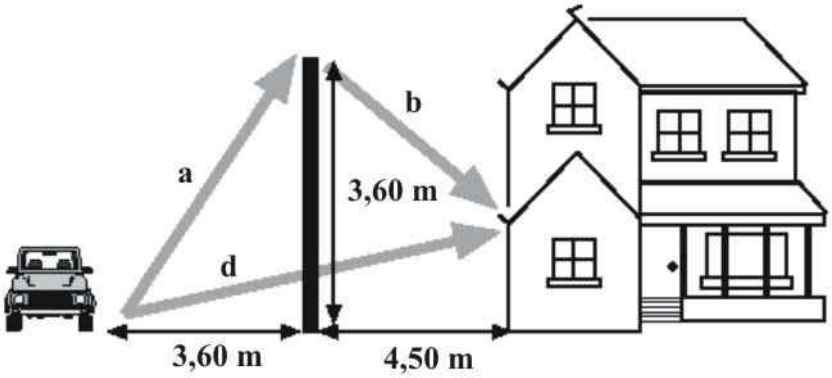


Figura 3.16 – Ilustração da trajetória da onda sonora devido à barreira acústica

Fonte: Adaptado de KLINGNER, MCNERNEY, BUSCH-VISHNIAC (2003)

O comprimento da trajetória da onda sonora em linha reta da fonte sonora até o receptor é:

$$d = \sqrt{(8{,}10)^2 + (1{,}20)^2} = 8{,}18m$$

Os comprimentos dos segmentos que compreendem o trajeto modificado são:

$$a = \sqrt{(3{,}60)^2 + (3{,}60)^2} = 5{,}09m$$
$$b = \sqrt{(4{,}50)^2 + (3{,}60 - 1{,}20)^2} = 5{,}10m$$

Tem-se:

$$\delta = (a + b) - d = (5{,}09 + 5{,}10) - 8{,}18 = 2{,}01m$$

Calcula-se então o número de Fresnel para a freqüência de 100Hz:

$$N = \frac{2 * 2{,}01}{340/100} = 1{,}18$$

Logo, a perda na inserção calculada por meio da Equação 3.12 é:

$$IL = 5 + 20\log\frac{\sqrt{2\pi * 1{,}18}}{\tanh\sqrt{2\pi * 1{,}18}} \approx 13{,}8dB$$

A perda na inserção calculada pode ser comparada com o valor obtido no gráfico da Figura 3.15.

Segundo Rathe (1969 apud JOSSE, 1975), a atenuação proporcionada por barreiras acústicas também pode ser calculada segundo a Equação 3.13.

$$\Delta L = 13 + 10\log N \qquad \text{(Eq. 3.13)}$$

onde:

"ΔL" é a atenuação proporcionada pela barreira [dB].

Por meio desta equação podem-se atingir valores próximos aos obtidos com a Equação 3.12. A Equação 3.13 é válida quando "N" é muito maior do que 1 e ΔL é dado em dB. O limite superior para a atenuação é de 24dB e, quando N=0, a atenuação será igual a 6dB.

3.5 RESSOADOR DE HELMHOLTZ

Frente aos elevados NPS hoje gerados pelo tráfego de veículos, buscam-se alternativas para melhorar o desempenho de barreiras acústicas, com o intuito de atingir-se NPS menos agressivos à população. Seguindo este raciocínio acredita-se que a utilização de ressoadores de Helmholtz em tais barreiras seja uma forma eficiente de contribuir com esse objetivo.

Os ressoadores de Helmholtz são sistemas acústicos que consistem de uma passagem de ar que se movimenta e está conectada com uma quantidade de ar presa num volume (Figura 3.17). Esse volume pode ter infinitas formas: concha, garrafa, estrutura de um instrumento musical, superfícies de paredes perfuradas.

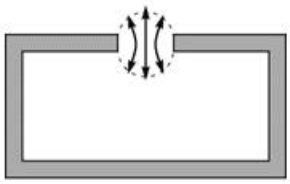


Figura 3.17 – Modelo genérico de ressoador de Helmholtz
Fonte: CAMPOS (2005)

Campos (2005) explica a geometria e a funcionalidade dos ressoadores de Helmholtz com o exemplo da garrafa vazia. O ar no pescoço da garrafa cria a mencionada passagem de ar e, o ar dentro do restante da garrafa, funciona como volume conjugado. A passagem tem uma massa acústica, a qual resulta de sua geometria e densidade específica do ar. Esta massa se sobrepõe ao restante do volume de ar da garrafa formando um sistema flutuante com uma ressonância.

Segundo Silva (2002), quando o ar interior desses ressoadores entra em vibração para uma certa freqüência de ressonância, pode dissipar a energia sonora transformando-a em energia mecânica, sob forma de atrito e funcionando, então, como absorvedor de som.

Para que o ressoador absorva o som, o ar flutuante da passagem deve ser freado ou ter sua velocidade reduzida através da fricção. Este efeito é obtido através da massa de ar do gargalo, a qual funciona como um êmbolo ligado a uma mola, ou seja, o volume de ar da garrafa. Na freqüência de ressonância deste sistema a absorção sonora é máxima. Também é possível utilizar ressoadores de Helmholtz para amplificar o som, como é o caso do violão.

Para Campos (2005), as aplicações mais usuais de ressoadores de Helmholtz são em estruturas verticais ou em placas suspensas no teto. A primeira hipótese é a aplicação sugerida neste trabalho.

Para estimar a freqüência de oscilação do ar nos ressoadores de Helmholtz (Figura 3.18), Rossing (1990 apud HENRIQUE, 2002) apresenta a Equação 3.14.

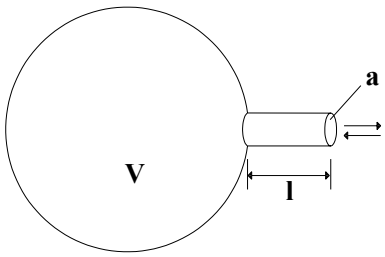


Figura 3.18 – Ressoador de Helmholtz

Fonte: HENRIQUE (2002)

$$f = \frac{c}{2 * \pi} \sqrt{\frac{a}{Vl}} \qquad \text{(Eq. 3.14)}$$

onde:

"f" é a freqüência do ressoador [Hz],

"a" é a área do gargalo [m^2],

"l" é comprimento do gargalo [m],

"V" é o volume do ressoador [m^3],

"c" é a velocidade do som no ar [m/s].

Por meio da análise da Equação 3.14 é possível verificar que quanto maior a área do gargalo, maior será a freqüência de ressonância; no entanto, a freqüência varia na razão inversa do comprimento do gargalo e do volume do ressoador, ou seja, quanto maior o volume, menor será a freqüência de ressonância. A forma da cavidade "V" não influencia a freqüência principal do ressoador.

Arizmendi (1980) salienta que é nesta freqüência que os ressoadores são realmente eficazes. Caso apliquem-se no interior do ressoador materiais porosos, ele será eficaz em uma faixa de freqüências mais ampla.

Conforme Ferraz Netto (2008) na boca do ressoador ocorre um efeito de jato durante as pulsações. Com isto, uma parte do ar no entorno da boca do ressoador também vibra criando um aumento virtual do comprimento do gargalo. Lord Rayleigh realizou estudos sobre este fato e concluiu que o resultado é um "comprimento acústico" não coincidente com o comprimento geométrico do gargalo. Portanto, para um gargalo curto, $L \approx r$ (comprimento geométrico do gargalo aproximadamente igual ao raio do gargalo), o comprimento acústico é dado pela Equação 3.15.

$$L_A = L + \pi * \frac{r}{2} \qquad \text{(Eq. 3.15)}$$

onde:

"L_A" é o comprimento acústico do gargalo [m],

"L" é o comprimento geométrico do gargalo [m],

"r" é o raio do gargalo [m].

Ainda segundo Ferraz Netto (2008), para $L >> r$ (comprimento geométrico do gargalo muito maior que o raio do gargalo), o comprimento acústico do gargalo "L_A" será igual ao comprimento geométrico do gargalo "L". No caso de $L = 0$ (comprimento geométrico do gargalo igual a zero), deve-se introduzir somente a correção dos extremos dada pela Equação 3.16.

$$L_A = \pi * \frac{r}{2} \qquad \text{(Eq. 3.16)}$$

onde:

"L_A" é o comprimento acústico do gargalo [m],

"r" é o raio do gargalo [m].

Sugere-se a utilização de ressoadores de Helmholtz em barreiras acústicas para maior atenuação do ruído, em especial ruídos de baixa freqüência. Estes ressoadores podem ser peças de diversos materiais. Como exemplo, citam-se blocos de concreto, placas perfuradas, garrafas PET (Polietileno Tereftalato) (SANTOS, 2005), entre outros. Porém é necessário que se calculem o volume do ressoador, a área de abertura e o comprimento desta abertura para que a peça produza o efeito esperado de atenuadora do ruído. Neste trabalho, far-se-á um estudo de peças cerâmicas moldadas de tal forma que reproduzam ressoadores de Helmholtz e de sua utilização para a construção de barreiras acústicas.

3.6 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE ABSORÇÃO SONORA DE SABINE

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine de um material deve-se realizar o ensaio conforme a ISO 354 (*Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003*). O método deve ser aplicado em câmara reverberante, a qual tem as superfícies construídas de forma a maximizar o som refletido, com o intuito de gerar um campo difuso.

O ensaio consiste na colocação de uma amostra do material no piso da câmara reverberante e medição do tempo de reverberação com a amostra (T_{60}). Feito isto, retira-se a amostra e mede-se o tempo de reverberação da câmara sem a amostra (T'_{60}). Conforme Bistafa (2006), calcula-se então o coeficiente de absorção sonora de Sabine da amostra por meio da Equação 3.17.

$$\alpha_{Sab} = 0{,}161\frac{V}{S}\left(\frac{1}{T_{60}} - \frac{1}{T'_{60}}\right) \qquad \text{(Eq. 3.17)}$$

onde:

"α_{Sab}" é o coeficiente de absorção sonora de Sabine,

"V" é o volume da câmara [m^3],

"S" é a área da amostra [m^2],

"T_{60}" é o tempo de reverberação com a amostra [s],

"T'_{60}" é o tempo de reverberação sem a amostra [s].

Ainda segundo Bistafa (2006), a Equação 3.17 resulta da aplicação da fórmula de Sabine duas vezes, ou seja, *com* e *sem* a amostra no interior da câmara.

3.7 LEGISLAÇÃO E NORMATIZAÇÃO

Neste item são feitos alguns comentários a respeito dos parâmetros normativos empregados na elaboração deste trabalho. Estes parâmetros referem-se aos NPS permissíveis, aos procedimentos de medição sonora e à determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine. Incluem-se a Lei Complementar Nº 218/98 da cidade de Maringá, estado do Paraná, a NBR 10151/2000 e a ISO 354/2003.

3.7.1 Lei Complementar Nº 218/98

Como parâmetro de comparação no que se refere a NPS permissíveis em áreas urbanas na cidade de Maringá, estado do Paraná, aqui será utilizada a Lei Complementar Nº 218/98 que dispõe sobre o controle e a fiscalização das atividades que geram poluição sonora, impõe penalidades e dá outras providências.

Transcreve-se a seguir na Tabela 3.4 o "*ANEXO I - TABELA I*" da referida Lei Complementar.

Tabela 3.4 – Limites máximos de sons e ruído permissíveis

Zonas de Uso	Diruno	Noturno
Zona Especial - ZE Zonas de Proteção Ambiental - ZPA Zonas Residenciais - ZR Eixos Residenciais - ER	55dB(A)	45dB(A)
Zona Central - ZC Eixos de Comércio e Serviços - ECS Terminal de Transportes - TT Central de Abastecimento - CA	**60dB(A)**	**50dB(A)**
Zona Industrial 1 - ZI-1 Av. Colombo, Anel Viário Prefeito Sincler Sambatti (Contorno Sul) e vias de acesso. Zona de Comércio Atacadista - ZCA	65dB(A)	55dB(A)
Demais Zonas Industriais	70dB(A)	60dB(A)

Fonte: PREFEITURA MUNICIPAL DE MARINGÁ (1998)

Destacam-se na Tabela 3.4 os valores de NPS permissíveis na zona central, por esta se aplicar ao caso estudado.

3.7.2 NBR 10151/2000

A NBR 10151, intitulada *Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade – procedimento, 2000*, também traz valores tabelados para avaliação do ruído em ambientes externos (Tabela 3.5). Comparam-se estes valores com o nível corrigido, o qual é determinado pelo Nível de Pressão Sonora equivalente.

Tabela 3.5 – Nível de critério de avaliação NCA para ambientes externos, em dB(A)

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: ABNT (2000)

Além destes valores, a NBR 10151/2000 determina os procedimentos para medições no exterior de edificações, dentre os quais se destacam alguns pontos de interesse:

- ✓ As medições devem ser efetuadas em pontos afastados aproximadamente um metro e vinte centímetros do piso e pelo menos a dois metros de quaisquer outras superfícies refletoras.

- ✓ Deve-se prevenir o efeito de ventos sobre o microfone com o uso de protetor.
- ✓ Não devem ser efetuadas medições na existência de interferências audíveis advindas de fenômenos da natureza (por exemplo: trovões, chuvas fortes etc).
- ✓ O tempo de medição deve ser escolhido de forma a permitir a caracterização do ruído em questão. A medição pode envolver uma única amostra ou uma seqüência delas.

Ainda segundo a NBR 10151/2000 uma análise espectral pode ser necessária para investigar a necessidade de medidas corretivas.

3.7.3 ISO 354/2003

Esta norma especifica um método para medição do coeficiente de absorção sonora de materiais acústicos em câmara reverberante. O princípio deste ensaio é medir-se a média do tempo de reverberação na câmara reverberante com e sem o material testado. A partir destes tempos de reverberação é calculada a área equivalente de absorção sonora usando a equação de Sabine.

O volume da câmara reverberante deve ser de no mínimo 150m^3. Para novas construções o volume recomendado é de no mínimo 200m^3. Caso o volume da sala seja maior que 500m^3, provavelmente não será possível medir a absorção sonora com precisão nas altas freqüências devido à absorção sonora.

Quanto à forma, a câmara reverberante deve obedecer à condição imposta pela Equação 3.18.

$$l_{máx} < 1{,}9 * V^{1/3} \qquad \text{(Eq. 3.18)}$$

onde:

"$l_{máx}$" é o comprimento da linha reta mais longa que se ajusta nos limites da câmara (por exemplo, em uma sala retangular é a diagonal principal) [m],

"V" é o volume da câmara [m^3].

A recomendação da ISO 354/2003 é de que a área de material absorvente testada seja entre 10 e 12m^2. Caso o volume "V" da câmara reverberante seja maior que 200m^3, o limite superior desta área deverá ser acrescido do fator $(V/200m^3)^{2/3}$.

A área escolhida depende do volume da câmara e da capacidade de absorção da amostra. Quanto maior a câmara, maior deve ser a área de teste. Para materiais com baixa absorção, deve ser escolhida a maior área do intervalo.

A amostra de material a ser testado deverá ter forma retangular com uma relação entre largura e comprimento entre 0,7 e 1. Deverá ser disposta de maneira que nenhuma parte esteja a menos de 1m (um metro) dos limites da câmara. Em casos extremos esta distância será de pelo menos 0,75m.

Mudanças de temperatura e umidade relativa no decorrer da medição podem ter um grande efeito no tempo de reverberação medido, principalmente nas altas freqüências e baixas umidades relativas. Devido a este fato, as medidas com a sala vazia e com o material a ser testado devem ser executadas com as mesmas condições de temperatura e umidade relativa. Desta forma, a absorção sonora do ar não será alterada significativamente. A umidade relativa deve estar entre 30 e 90% e a temperatura deve ser de pelo menos 15°C.

4 AVALIAÇÃO DE BARREIRAS: PROCEDIMENTOS

Neste capítulo é apresentado o método empregado para avaliar o desempenho de barreiras acústicas construídas com ressoadores de Helmholtz, bem como os materiais e equipamentos utilizados no processo de avaliação. Dividiu-se a pesquisa em seis etapas, sendo elas:

a) Caracterização da área de estudo quanto ao NPS gerado no seu entorno e aos níveis sonoros medidos em pontos de interesse;

b) Dimensionamento e fabricação dos ressoadores de Helmholtz na escala 1:5;

c) Determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine dos ressoadores de Helmholtz em câmara reverberante;

d) Construção de barreiras acústicas na escala 1:5 com tijolos simples e com ressoadores de Helmholtz seguida de medições de NPS para testar sua real eficiência;

e) Simulação do desempenho de barreiras acústicas construídas com tijolos simples e com ressoadores de Helmholtz por meio do software SoundPLAN®;

f) Cálculo do desempenho de barreiras acústicas construídas com tijolos simples e com ressoadores de Helmholtz aplicando o conceito de perda na inserção conforme modelagem proposta por Kurze e Anderson (1971 apud KLINGNER, MCNERNEY, BUSCH-VISHNIAC, 2003).

4.1 ÁREAS DE ESTUDO

Para a realização deste estudo fez-se uso de duas áreas distintas: a primeira, destinada à caracterização do ruído de tráfego e simulação de barreiras acústicas em tamanho real e a segunda, destinada aos ensaios e simulações realizados com barreiras acústicas na escala 1:5.

A região destinada à caracterização do ruído de tráfego consiste de uma área da cidade de Maringá, Estado do Paraná, onde o Nível de Pressão Sonora gerado pelo tráfego de veículos é elevado e não existe qualquer proteção às edificações no seu entorno. Esta área localiza-se no campus sede da Universidade Estadual de Maringá e caracteriza-se por estar à margem da Avenida Colombo, avenida esta que cruza a cidade de leste a oeste em área

urbana permitindo a continuidade de tráfego da Rodovia BR 376. A Figura 4.1 traz um trecho da Avenida Colombo e neste destaca-se a área de estudo propriamente dita.

Figura 4.1 – Área de Estudo: Avenida Colombo
Fonte: GOOGLE EARTH (2007)

No trecho estudado a Avenida Colombo recebe uma taxa de veículos da ordem de 33.223 veículos/dia sendo que aproximadamente 13% são veículos pesados (PURPUR, 1999).

A área destinada aos ensaios e simulações realizados com barreiras acústicas na escala 1:5 também se localiza no campus sede da Universidade Estadual de Maringá. Trata-se de um local plano e com grama. Árvores, desníveis do terreno e edificações estão distantes dos pontos de ensaio. A Figura 4.2 traz uma imagem aérea onde se destaca a área de ensaio e, a Figura 4.3, uma fotografia para melhor visualização.

Figura 4.2 – Área de Estudo: UEM, imagem aérea

Fonte: GOOGLE EARTH (2007)

Figura 4.3 – Área de Estudo: UEM

4.2 METODOLOGIA

Conforme já mencionado, a metodologia adotada nesta pesquisa divide-se em seis etapas. A seguir, far-se-á o detalhamento de cada uma delas.

4.2.1 Caracterização do ruído na área de estudo

Esta etapa consistiu da coleta de dados de NPS na área de estudo próxima à Avenida Colombo. A coleta foi efetuada em seis pontos de interesse, conforme indicado na Figura 4.4, sendo o ponto P1 localizado na calçada a um metro do meio-fio, o ponto P2 localizado a um metro do limite do terreno no interior do mesmo (a um metro do alambrado, local onde após foi locada a barreira acústica por ocasião da simulação), e os pontos P3, P4, P5 e P6 localizados respectivamente a três, seis, nove e quarenta metros do limite do terreno, também no seu interior.

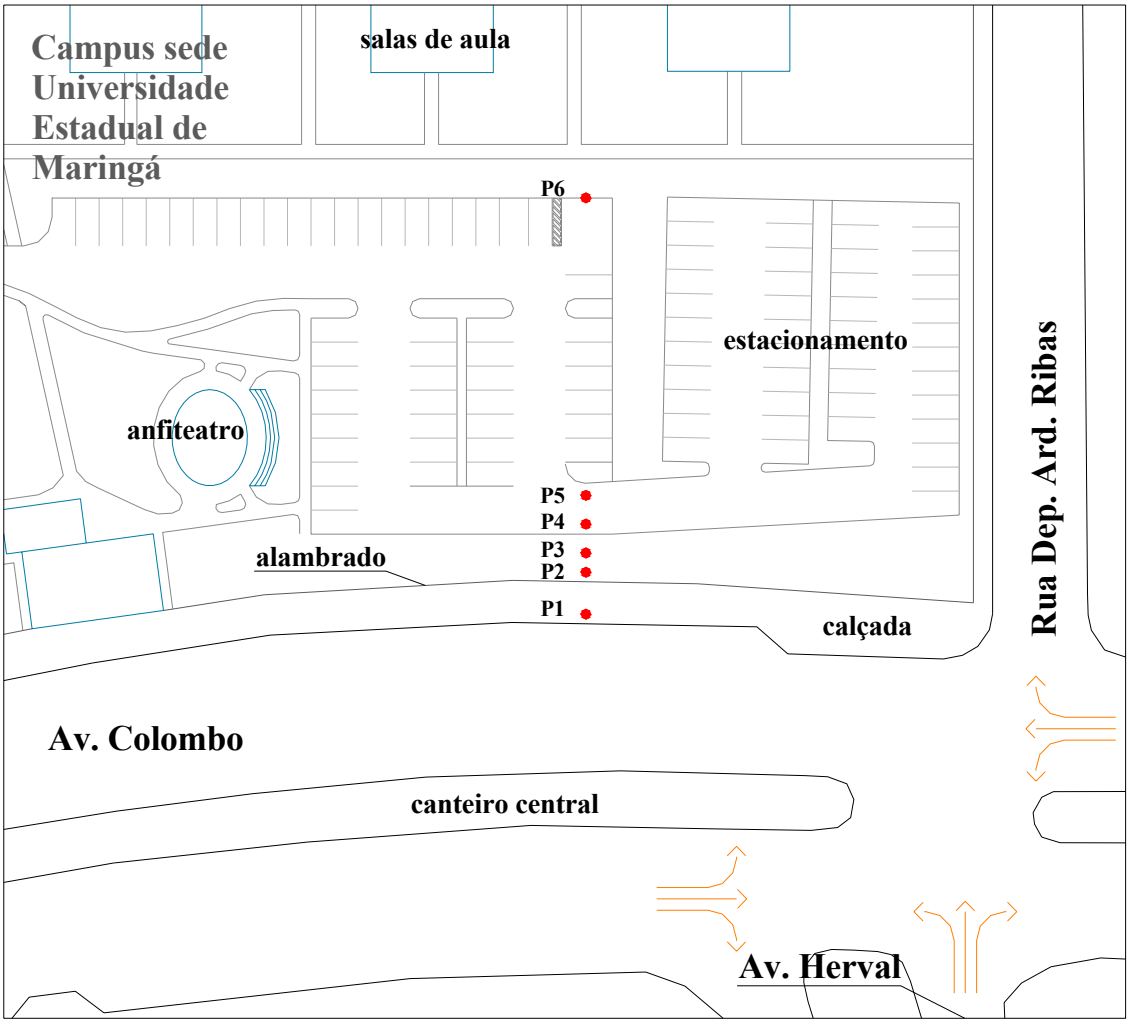


Figura 4.4 – Pontos de monitoramento de Nível de Pressão Sonora – Avenida Colombo

Na fotografia apresentada na Figura 4.5 tem-se uma visão da área monitorada a partir da calçada próximo ao ponto P1.

Figura 4.5 – Área de monitoramento a partir da calçada

Para a coleta de dados dispôs-se de um medidor de Nível de Pressão Sonora da 01dB® com filtro de oitava e de um microfone omnidirecional da Beringher de ½" conectado ao programa TrueRTA™ cujo processo de funcionamento é explanado no Anexo A. Coletaram-se dados em banda de oitava sempre com os dois aparelhos simultaneamente, sendo que o microfone manteve-se por todo o período de medição no ponto P1 e o medidor de NPS fez o caminhamento entre os outros pontos de coleta de dados. Desta forma tornou-se possível avaliar a redução do ruído conforme ocorria o distanciamento da fonte sonora, sendo esta, no caso em questão, o tráfego de veículos na Avenida Colombo.

Em cada ponto a coleta estendeu-se por quinze minutos, com aquisição de dados a cada três segundos.

Gaja *et al.* (2003) desenvolveu uma pesquisa para estimativa do nível equivalente anual de ruído em condições de tráfego urbano. Gaja concluiu que, se a estratégia de amostragem envolver dias escolhidos ao acaso, então deveriam ser usados pelo menos seis dias. O estudo estendeu-se por cinco anos e baseou-se em medidas de quinze minutos de duração com níveis sonoros equivalentes contínuos.

Em uma análise dos dados coletados, Gaja *et al.* (2003) verificaram que, efetuando medidas por três dias, sendo estes escolhidos ao acaso, a probabilidade de ter-se erros de 1dB a mais ou a menos em relação ao valor real é de 75%. Caso permitam-se erros de ±2dB, a probabilidade de os valores coletados estarem dentro desta margem é de 95% e, para erros de ±3dB, a probabilidade é de 97%. Considerando que o monitoramento descrito a seguir repetiu-se por três vezes em dias escolhidos aleatoriamente, pode-se afirmar que os valores coletados representam satisfatoriamente o ruído monitorado.

Como o intuito deste trabalho é buscar uma medida corretiva para os problemas provenientes do ruído gerado pelo tráfego de veículos em vias públicas, optou-se por fazer uma análise espectral deste ruído conforme recomendação da NBR 10151 – *Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade, 2000*. No item 3.7.2, anteriormente apresentado, listam-se os procedimentos recomendados pela NBR 10151 para a caracterização do ruído.

Em um primeiro instante, posicionaram-se o medidor de NPS e o microfone no ponto P1, ou seja, na calçada a um metro do meio-fio, voltados para a via de tráfego a 1,20m (um metro e vinte centímetros) de altura (Figura 4.6). Esta medida, com os dois equipamentos no mesmo ponto, foi utilizada para fazer-se uma calibração dos dados coletados nas etapas subseqüentes do monitoramento, quando os dois aparelhos estiveram em locais diferentes, mas efetuando medidas simultaneamente.

Figura 4.6 – Ponto de monitoramento P1

Após, o microfone permaneceu no ponto P1 e o medidor de NPS foi posicionado no ponto P2, ou seja, distando um metro do alambrado no interior do terreno. Na Figura 4.7 é possível observar o medidor de NPS no ponto P2 e, ao fundo, o microfone no ponto P1.

Figura 4.7 – Ponto de monitoramento P2

Na seqüência o medidor de NPS foi posicionado nos pontos P3, P4, P5 e P6 respectivamente a três, seis, nove e quarenta metros do alambrado no interior do terreno. Na Figura 4.8 observa-se o medidor de NPS no ponto P5 e, na Figura 4.9, no ponto P6 com vista para a Avenida Colombo.

Figura 4.8 – Ponto de monitoramento P5

Figura 4.9 – Ponto de monitoramento P6

Conforme já mencionado, este processo foi repetido três vezes nos períodos constantes na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Períodos de monitoramento do ruído na Avenida Colombo

Data	Horário	
	Início	Fim
29 de junho de 2007	17h 50min	19h 40min
02 de julho de 2007	10h 50min	13h 10min
02 de julho de 2007	17h 15min	19h 10min

4.2.2 Dimensionamento e fabricação dos ressoadores de Helmholtz

Com base nos dados de Nível de Pressão Sonora medidos conforme explanado no item 4.2.1, dimensionou-se o ressoador de Helmholtz para a freqüência de interesse. Para tanto, aplicou-se a Equação 3.14 anteriormente apresentada.

Após o dimensionamento, elaborou-se o projeto da peça, ou seja, do ressoador, para que fosse fabricada a boquilha, molde utilizado na produção de peças cerâmicas.

O dimensionamento do ressoador em si e as dimensões da boquilha serão apresentados no item 5.1.2 referente aos resultados obtidos nesta pesquisa.

Os ressoadores foram fabricados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Maringá. A fabricação envolveu as seguintes etapas:

- ✓ Secagem da argila.
- ✓ Destorroamento[2] da argila em moinho de barras.
- ✓ Peneiramento da argila em peneira de 6,3mm e 2,4mm.
- ✓ Adição de água para atingir a textura ideal para extrusão das peças.
- ✓ Extrusão dos ressoadores com a maromba e corte das peças.
- ✓ Secagem das peças à sombra para atingir a umidade ideal para queima.
- ✓ Queima dos ressoadores.

Descrevem-se a seguir com detalhes as etapas citadas.

A argila foi fornecida pela cerâmica Barra Bonita e foi necessário destorroá-la e peneirá-la para possibilitar a fabricação dos ressoadores. Primeiramente espalhou-se a argila ao sol para diminuir a umidade conforme ilustra a Figura 4.10.

Figura 4.10 – Secagem da argila ao sol

Após a secagem fez-se o destorroamento da argila em um moinho de barras (Figura 4.11) Para isso colocava-se a argila no moinho juntamente com barras de aço. O movimento giratório do moinho permitia que os torrões de argila se desfizessem.

---

[2] Desfazer os torrões (pedaços de terra endurecidos).

Figura 4.11 – Destorroamento da argila

Em seguida fez-se o peneiramento da argila nas peneiras de 6,3mm e 2,4mm. À argila peneirada adicionou-se água até formar uma pasta como a apresentada na Figura 4.12. Esta pasta era introduzida na maromba para a confecção dos ressoadores. Maromba é a máquina utilizada na fabricação de tijolos.

Figura 4.12 – Pasta de argila com água

A boquilha, molde utilizado para a confecção dos ressoadores, foi confeccionada em aço e é apresentada na Figura 4.13.

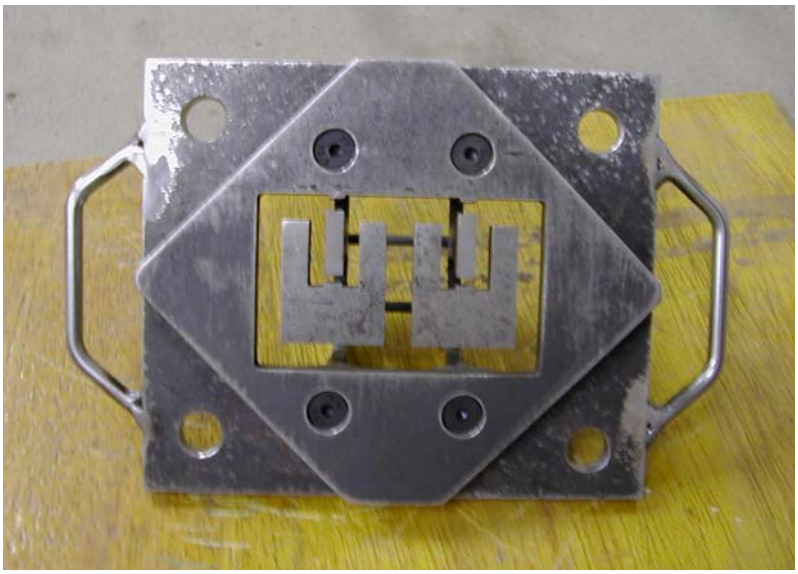


Figura 4.13 – Boquilha

Confeccionaram-se os ressoadores conectando a boquilha na maromba conforme a Figura 4.14.

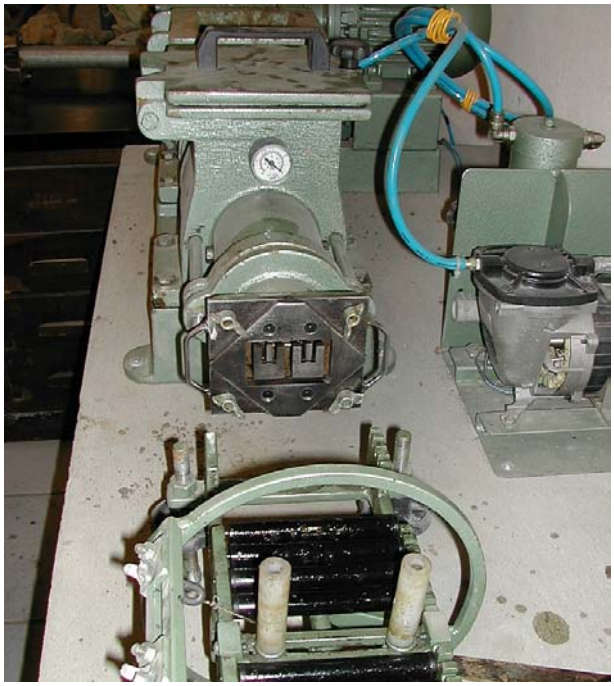


Figura 4.14 – Maromba

A maromba permite a fabricação das peças por extrusão. Ainda na Figura 4.14 observam-se, à frente da maromba, rolos por onde passa o material que sai da extrusão. Em seguida este material é cortado na dimensão do ressoador com fios de aço reguláveis dispostos ao longo dos rolos (Figura 4.15).

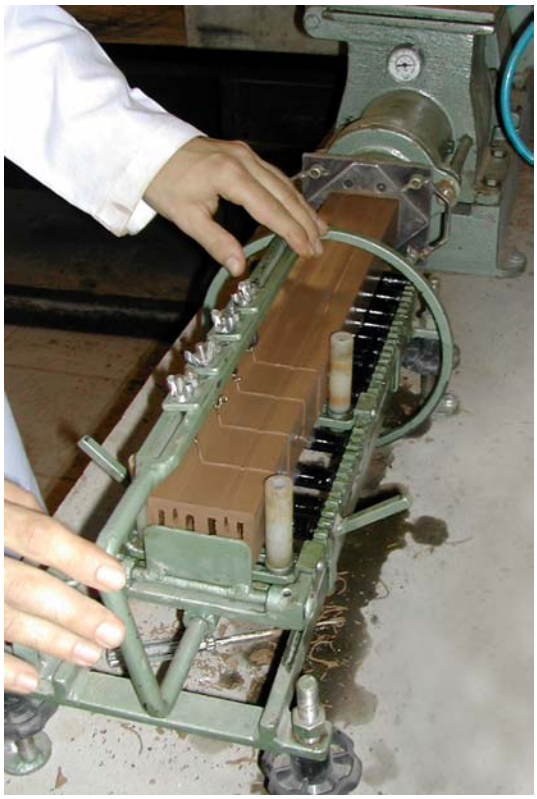


Figura 4.15 – Extrusão e corte dos ressoadores

Após a extrusão e corte os ressoadores foram armazenados em local seco e não exposto ao sol aonde permaneceram por cerca de quatro dias. Esta secagem é feita para que as peças cerâmicas não trinquem na hora da queima.

A queima das peças foi feita em forno da cerâmica Barra Bonita na cidade de Japurá, estado do Paraná. A temperatura de queima atinge cerca de 900ºC. O tipo de forno utilizado na queima é o da Figura 4.16.

Figura 4.16 – Forno utilizado na queima dos ressoadores

Na Figura 4.17 apresenta-se a peça resultante do processo descrito.

Figura 4.17 – Peça fabricada

Finalizado o processo de fabricação fez-se um corte na peça para que se formasse o ressoador. A Figura 4.18 mostra como foi feito este corte e, a Figura 4.19, o ressoador propriamente dito.

Figura 4.18 – Corte para formar o ressoador

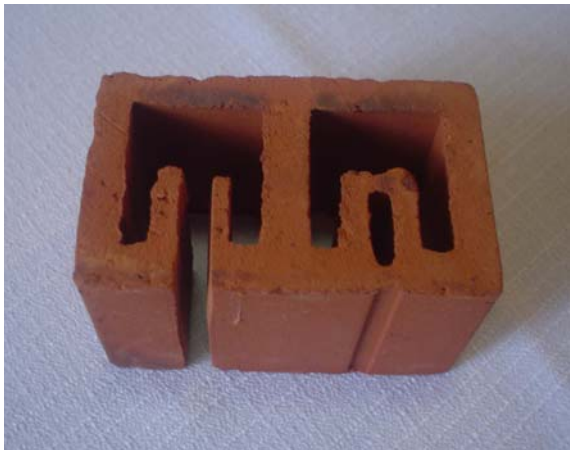


Figura 4.19 – Ressoador de Helmholtz

Observa-se que, mesmo sendo possível fazer dois cortes em cada peça para formar dois ressoadores, foi feito somente um. Isto é devido à freqüência de interesse deste trabalho e será detalhado posteriormente.

4.2.3 Determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine dos ressoadores de Helmholtz em câmara reverberante

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine dos ressoadores na escala 1:5, realizou-se ensaio em câmara reverberante seguindo algumas recomendações da ISO 354 – *Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room*. Estas recomendações foram descritas no item 3.7.3.

Os ensaios foram realizados na câmara reverberante do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada – LACAF da Universidade Estadual de Campinas. Os dados sobre a geometria da câmara reverberante são os apresentados no Anexo B, ressaltando-se que o volume da sala é igual a 71,8m^3. As medidas de tempo de reverberação envolveram três situações:

- ✓ Sala vazia.
- ✓ Sala com área de peças com corte, a partir daqui denominadas *ressoadores* e sem vedação das juntas.
- ✓ Sala com área de ressoadores com vedação das juntas.

Descreve-se a seguir o procedimento empregado na realização deste ensaio.

Primeiramente determinou-se a área de material necessária para o cálculo do coeficiente de absorção sonora de Sabine. Fez-se este cálculo levando em consideração a semelhança geométrica entre modelo e protótipo. O seu desenvolvimento encontra-se no item 5.1.3 referente aos resultados.

Determinada a área do material necessária em função da escala utilizada, fez-se a distribuição das peças na câmara reverberante formando um painel de ressoadores conforme ilustram as Figuras 4.20, durante a colocação das peças, e 4.21 com o painel montado.

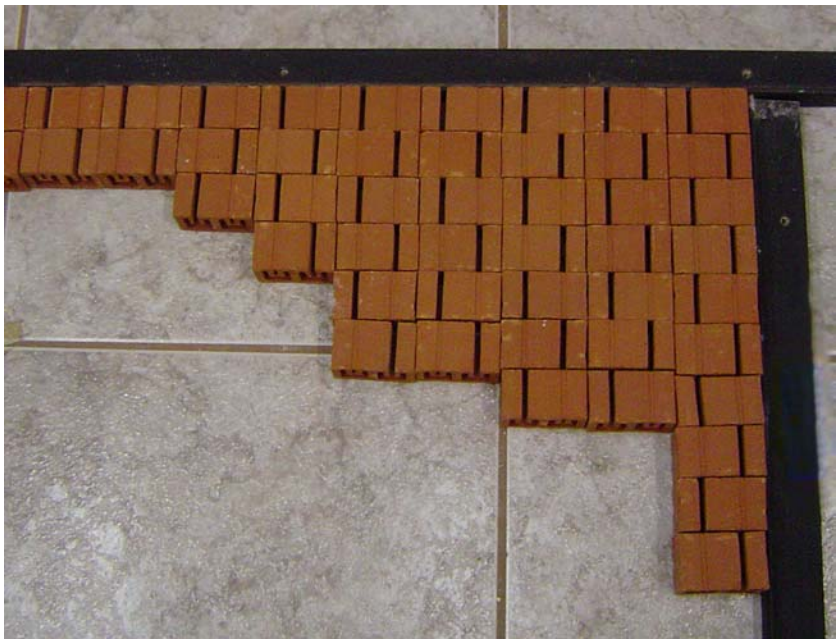


Figura 4.20 – Montagem do painel de ressoadores

Figura 4.21 – Painel de ressoadores

A modulação adotada intercalando as aberturas das peças diz respeito à freqüência de interesse o que está exposto no capítulo seguinte. Nesta etapa dos ensaios não se fez a vedação das juntas, o que foi feito na etapa posterior.

As laterais do painel que ficaram abertas foram vedadas com fita adesiva de alumínio da 3M® para diminuir a interferência da absorção sonora das laterais do painel. Observa-se na Figura 4.22 uma lateral sem a fita e com a fita adesiva.

Figura 4.22 – Vedação das laterais do painel

Com o painel pronto mediu-se o tempo de reverberação na sala em quatro pontos com três decaimentos cada ponto. Repetiu-se este procedimento para duas posições da fonte sonora. Na Figura 4.23 observa-se a locação dos pontos de medição, sendo que dois deles avançaram sobre o painel de ressoadores, e também as duas posições da fonte sonora.

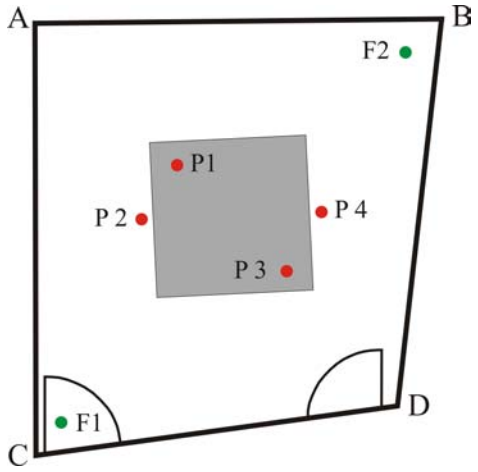


Figura 4.23 – Locação dos pontos de medição e da fonte sonora na câmara reverberante

Para medir-se o tempo de reverberação e depois gerar os relatórios foi utilizado o *Building Acoustic System* da *Brüel & Kjær*. Este sistema é composto pelos itens a seguir:

- ✓ Analisador sonoro de precisão modelo 2260 carregado com o software interno BZ 7204 V 1.0.
- ✓ Amplificador de potência, modelo 2716.
- ✓ Fonte sonora omnidirecional, modelo 4296.
- ✓ Software "Qualifier", modelo 7830 V. 1.1.

Observa-se na Figura 4.24 o posicionamento do analisador sonoro, da fonte sonora e do painel de ressoadores por ocasião das medições efetuadas no ponto P1 com a fonte na posição F1 e, na Figura 4.25, no ponto P4 com a fonte na posição F2. Foram coletados dados em banda de 1/3 de oitava de 63 a 10kHz. Salienta-se que nesta etapa não foi feita a vedação das juntas do painel de ressoadores.

Figura 4.24 – Ponto P1 e fonte sonora na posição F1 com painel de ressoadores com juntas sem vedação

Figura 4.25 – Ponto P4 e fonte sonora na posição F2 com painel de ressoadores com juntas sem vedação

Após medir-se o tempo de reverberação nos quatro pontos e com as duas posições da fonte sonora, fez-se a vedação das juntas do painel utilizando cola quente. Este procedimento tem o intuito de verificar a variação do tempo de reverberação do painel com e sem a vedação das juntas. Na Figura 4.26 é possível observar o processo de aplicação da cola quente e, na Figura 4.27, o painel com todas as juntas vedadas.

Figura 4.26 – Vedação das juntas do painel de ressoadores com cola quente

Figura 4.27 – Painel de ressoadores com as juntas vedadas com cola quente

Observa-se na Figura 4.27 o detalhe da vedação das juntas laterais do painel.

Repetiram-se então as medidas de tempo de reverberação nos quatro pontos e com as duas posições de fonte apresentados na Figura 4.23. Foi adotado o mesmo procedimento de três decaimentos para cada combinação de posição de fonte sonora e analisador sonoro. A

Figura 4.28 traz o analisador sonoro na posição P2 e a fonte sonora na posição F2. Observa-se o painel de ressoadores com as juntas vedadas.

Figura 4.28 – Ponto P2 e fonte sonora na posição F2 com painel de ressoadores com juntas vedadas

Feitas todas as medições de tempo de reverberação necessárias com o painel de ressoadores na câmara reverberante, retirou-se o painel para efetuarem-se as medidas com a sala vazia. Mantiveram-se as mesmas posições de pontos de medição e de fonte sonora, bem como os três decaimentos em cada combinação de posição de fonte sonora e ponto de coleta de dados. A Figura 4.29 apresenta o analisador sonoro no ponto P1 e a fonte na posição F1 sem painel de ressoadores.

Figura 4.29 – Ponto P1 com a fonte sonora na posição F1 sem o painel de ressoadores

Durante todo o procedimento descrito neste item, o qual foi realizado dentro da câmara reverberante, manteve-se um medidor de temperatura e umidade dentro da sala para verificar o comportamento destas variáveis. O medidor é da marca Testo®, modelo 175-H1 (Figura 4.30).

Figura 4.30 – Medidor de temperatura e umidade

De posse dos dados destas medições, calculou-se o coeficiente de absorção sonora de Sabine dos ressoadores conforme procedimento descrito no item 3.6. A curva de absorção calculada foi utilizada nas simulações que serão descritas no item 4.2.5.

4.2.4 Construção de barreiras acústicas na escala 1:5 e avaliação do NPS resultante

As barreiras acústicas na escala 1:5 foram construídas no campus sede da Universidade Estadual de Maringá no local apresentado nas Figuras 4.2 e 4.3. Foram construídas duas barreiras: uma com peças cerâmicas sem "corte" conforme a Figura 4.17, a partir daqui denominadas "*tijolos simples*" e outra com os "*ressoadores*" (Figura 4.19).

Além de medir-se a atenuação proporcionada por estas barreiras, a partir dos valores coletados planejava-se calcular a perda na inserção das barreiras (IL) conforme o item 3.4, o que foi feito. Entende-se aqui por *atenuação* simplesmente a subtração "NPS medido em um ponto na face de uma barreira acústica voltada para a fonte sonora" menos "NPS medido em pontos pré-determinados na face da barreira oposta à geração do ruído". Ao efetuar esta subtração obtem-se o valor real de redução do NPS proporcionado por uma barreira acústica, levando em conta além da geometria da barreira, todo o entorno, como por exemplo a absorção do solo.

Necessitou-se, portanto, coletar dados de NPS com e sem as barreiras. Para isto, locou-se a construção conforme a Figura 4.31.

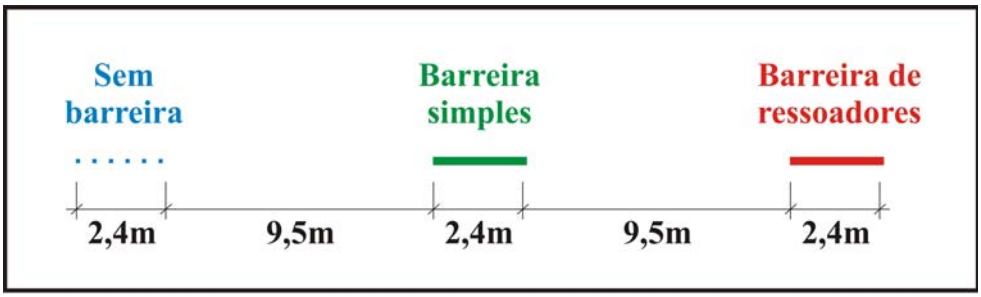


Figura 4.31 – Locação das barreiras na escala 1:5

Como se pode observar na Figura 4.31, as barreiras distaram 9,5m (nove metros e cinqüenta centímetros) uma da outra e foram denominadas *barreira simples* (aquela construída com tijolos simples) e *barreira de ressoadores* (aquela construída de ressoadores de Helmholtz). Determinou-se também o local onde foi efetuada a coleta de dados sem barreira acústica. No que diz respeito às dimensões das barreiras, determinou-se que a barreira em tamanho real teria 12m (doze metros) de extensão e 6m (seis metros) de altura. Desta forma, as barreiras construídas têm aproximadamente 2,4m (dois metros e

quarenta centímetros) de extensão por 1,2m (um metro e vinte centímetros) de altura. Estas dimensões variaram para cada barreira e serão detalhadas por ocasião das simulações e do cálculo da perda na inserção das barreiras.

A construção das barreiras simples e de ressoadores seguiu o mesmo procedimento. Primeiramente distribuíram-se quatro barras de aço de 8mm de diâmetro ao longo da extensão de cada barreira. As barras tinham 1,60m (um metro e sessenta centímetros) de altura cada uma. Cada barra foi fixa verticalmente no solo sendo que cerca de 0,30m (trinta centímetros) de sua extensão ficou sob o solo. Estas barras tinham a função de dar estabilidade às barreiras (Figura 4.32).

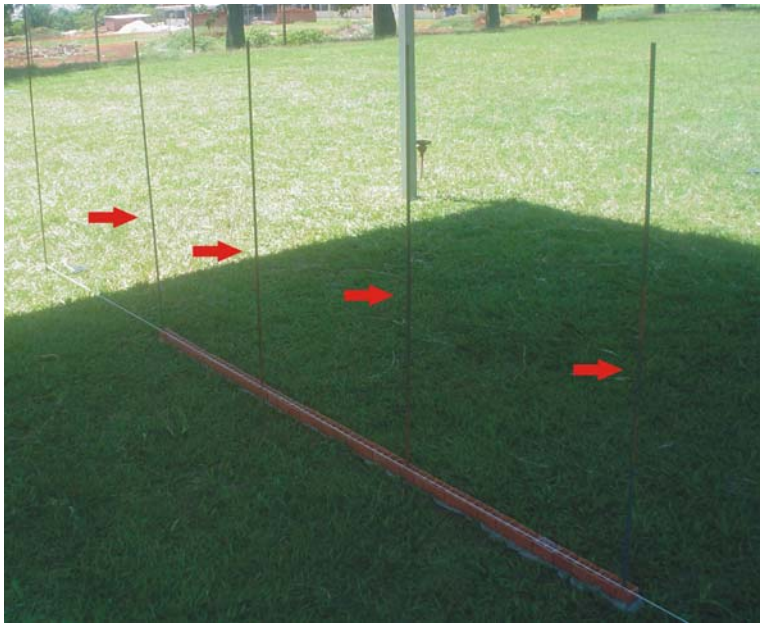


Figura 4.32 – Barras de aço: início da construção

Em seguida distribuiu-se uma camada de massa de vidro para atuar como base e vedar a passagem de ondas sonoras sob as barreiras já que elas foram construídas sobre terreno gramado com pequenas irregularidades. Conforme se observa na Figura 4.32 e 4.33, sobre a massa de vidro assentou-se a primeira fiada de tijolos. Na Figura 4.33 apresenta-se em detalhe o início da construção da barreira simples, onde se destacam a camada de massa de vidro e a primeira fiada de tijolos simples.

Figura 4.33 – Construção da barreira simples: primeira fiada

Observa-se na Figura 4.33 a forma de encaixe dos tijolos nas barras de aço. Procedeu-se da mesma maneira nas duas barreiras.

Para fixação dos tijolos uns aos outros, utilizou-se cola quente. A Figura 4.34 traz um detalhe da aplicação da cola na barreira simples.

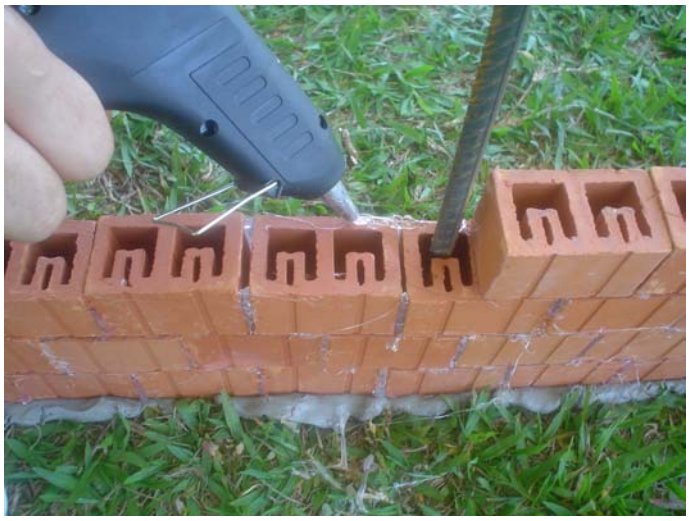


Figura 4.34 – Construção da barreira simples: aplicação da cola quente

Chama-se atenção ao fato de que na barreira simples fez-se a amarração dos tijolos (Figura 4.34), enquanto na barreira de ressoadores optou-se por não fazê-la devido a imperfeições nas peças provenientes de sua produção artesanal. Desta forma, preservou-se a correta

junção de volumes entre uma peça e outra na modulação dos ressoadores. Este detalhe será discutido durante a análise dos resultados. A Figura 4.35 mostra detalhe da construção da barreira de ressoadores onde se observa o posicionamento das peças sem amarração.

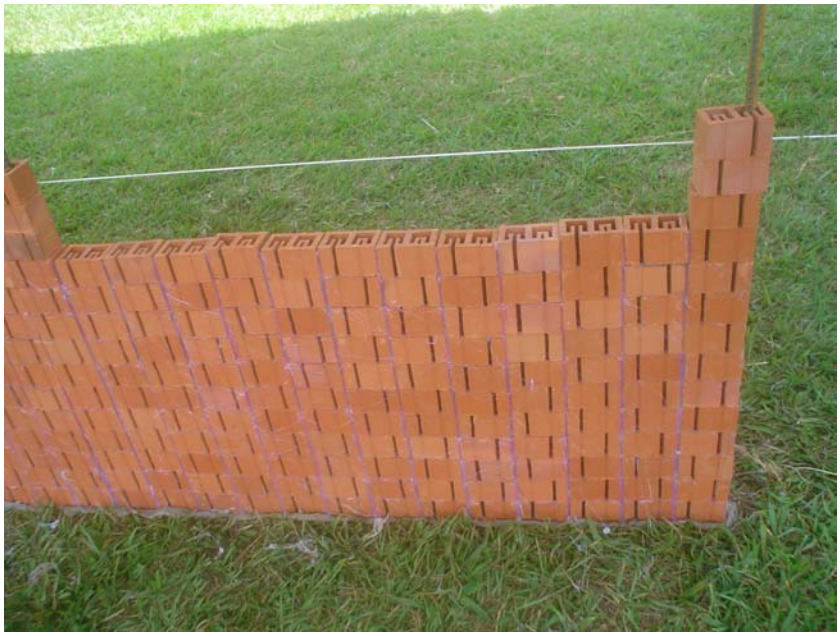


Figura 4.35 – Construção da barreira de ressoadores: posicionamento das peças

Com as barreiras prontas, fez-se a vedação e regularização do topo de cada uma delas. Para isto, fixou-se fita adesiva para a vedação e, sobre ela, colocou-se uma camada de massa de vidro para fazer a regularização. Observa-se um detalhe na Figura 4.36.

Figura 4.36 – Construção das barreiras acústicas: vedação e regularização do topo

A Figura 4.37 apresenta as duas barreiras: à esquerda a barreira simples e, à direita, a barreira de ressoadores. As tendas foram utilizadas como proteção durante a construção e retiradas logo após para efetuarem-se as medições.

Figura 4.37 – Barreiras acústicas

As medições de NPS seguiram os moldes do apresentado no item 4.2.1. A coleta de dados envolveu seis pontos de medição conforme ilustra a Figura 4.38.

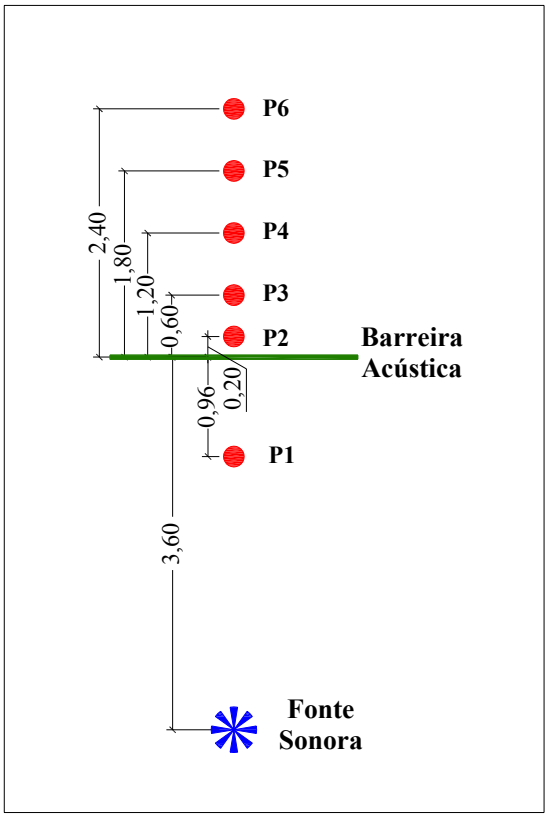


Figura 4.38 – Pontos de coleta de dados para análise das barreiras acústicas na escala 1:5

As distâncias apresentadas na Figura 4.38 são as distâncias da fonte sonora e dos receptores em relação à barreira acústica considerando esta construída na escala 1:5. Portanto, as distâncias representadas têm sua equivalência de acordo com a escala. Na Tabela 4.2 têm-se as distâncias em relação à barreira acústica para o modelo e para o protótipo.

Tabela 4.2 – Distância da fonte sonora e receptores em relação à barreira acústica

Posição	Distância em relação à barreira acústica [m]	
	Modelo	Protótipo
Fonte Sonora	3,60	18,00
P1	0,96	4,80
P2	0,20	1,00
P3	0,60	3,00
P4	1,20	6,00
P5	1,80	9,00
P6	2,40	12,00

A fonte sonora utilizada foi um amplificador cujo alto-falante ficou posicionado a 0,24m (vinte e quatro centímetros) de altura. Para que esta medida fosse correta, considerando a escala 1:5, deveria ter sido de aproximadamente 0,10m (dez centímetros). No entanto, como não foi possível adaptar a altura do alto-falante, optou-se por realizar o ensaio sem fazer a correta equivalência. Através deste alto-falante (Figura 4.39) emitiu-se ruído rosa para a efetivação dos ensaios.

Figura 4.39 – Amplificador

Para a coleta de dados dispôs-se de dois medidores de Nível de Pressão Sonora da 01dB®, um deles com filtro de oitava, e de um microfone omnidirecional da Beringher conectado ao software TrueRTA™. Coletaram-se os valores de NPS em banda de oitava.

Conforme procedimento utilizado para a caracterização do ruído de tráfego, o qual foi descrito no item 4.2.1, coletaram-se os dados sempre com os três aparelhos simultaneamente, sendo que o microfone omnidirecional manteve-se por todo o período de medição no ponto P1 o os medidores de NPS fizeram o caminhamento entre os outros pontos de coleta de dados. Este procedimento repetiu-se para as três situações ilustradas na Figura 4.31: sem barreira acústica, com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz. Salienta-se que, para a barreira acústica de ressoadores de Helmholtz, repetiu-se o procedimento de duas formas: a primeira, com os ressoadores voltados para a fonte sonora e, a segunda, com os ressoadores voltados para os pontos P2,

P3, P4, P5 e P6. Para isto, por ocasião desta medição, inverteu-se o lado da barreira em que esses pontos, além do ponto P1 e da fonte sonora, estavam locados.

Ilustram-se, a seguir, alguns momentos da coleta de dados.

Primeiramente, posicionaram-se os medidores de NPS e o microfone no ponto P1 voltados para a fonte sonora. O ponto P1 corresponde à posição de um receptor na calçada a um metro do meio-fio. Os três aparelhos foram ajustados para manterem uma altura de 0,24m (vinte e quatro centímetros) do chão, fazendo referência a uma altura de 1,20m (um metro e vinte centímetros) em tamanho real. Esta medição, com os três equipamentos no mesmo ponto, foi utilizada para fazer-se uma calibração dos dados coletados nas etapas subseqüentes do monitoramento, quando os aparelhos estiveram em locais diferentes, mas efetuando medidas simultaneamente. Observa-se na Figura 4.40 o posicionamento dos equipamentos para efetivar a medição no ponto P1 para a barreira simples. Ao centro está o microfone omnidirecional.

Figura 4.40 – Barreira simples: microfone omnidirecional e medidores de NPS no ponto P1 voltados para a fonte sonora

Em seguida, manteve-se o microfone omnidirecional no ponto P1 e os medidores de NPS foram posicionados no ponto P2, ou seja, na face da barreia oposta à geração do ruído. Na Figura 4.41 apresenta-se uma visão geral da situação descrita durante a medição para a barreira simples.

Figura 4.41 – Barreira simples: microfone omnidirecional no ponto P1 e medidores de NPS no ponto P2

A terceira medição efetuada para cada situação foi com o microfone omnidirecional no ponto P1 e os medidores de NPS no ponto P3. A Figura 4.42 traz essa situação para a medição efetuada na barreira de ressoadores quando estes estavam voltados para a fonte sonora.

Figura 4.42 – Barreira de ressoadores: microfone omnidirecional no ponto P1 e medidores de NPS no ponto P3 com ressoadores voltados para a fonte sonora

A quarta e a quinta medições efetuadas para cada situação foram com o microfone omnidirecional no ponto P1 e os medidores de NPS respectivamente nos pontos P4 e P5, ou seja, a 1,20m (um metro e vinte centímetros) e 1,80m (um metro e oitenta centímetros) distantes das barreiras.

E por fim, fez-se, para cada situação, uma medição com os medidores de NPS no ponto P6. Na Figura 4.43 observam-se os medidores neste ponto quando da medição com a barreira de ressoadores estando estes ressoadores voltados para a face da barreira oposta à geração do ruído.

Figura 4.43 – Barreira de ressoadores: microfone omnidirecional no ponto P1 e medidores de NPS no ponto P6 com ressoadores na face da barreira oposta à geração do ruído

Sempre que os medidores de NPS foram colocados nos pontos P2, P3, P4, P5 e P6 seus microfones foram voltados para a barreira e, no caso da medição sem barreira, na mesma direção em que estaria a barreira. A Figura 4.44 ilustra esta situação onde se vê uma linha vermelha no local onde estaria a barreira acústica. Nesta figura os medidores de NPS estão no ponto P6.

Figura 4.44 – Medição sem barreira: microfone omnidirecional no ponto P1 e medidores de NPS no ponto P6

Para cada combinação de posição do microfone omnidirecional e dos medidores de NPS coletaram-se os dados por quatro minutos. As tabelas contendo estes dados, bem como a interpretação dos mesmos encontram-se no capítulo referente a resultados e análises.

4.2.5 Simulação de barreiras acústicas com o programa SoundPLAN®

O programa SoundPLAN® permite que se criem situações, sejam elas reais ou de projeto, e, em uma locação virtual, se descreva o comportamento de ondas sonoras no meio criado. Os princípios de cálculo empregados pelo programa são descritos no Anexo C e foram utilizados para a simulação do desempenho de barreiras acústicas construídas com tijolos cerâmicos e com ressoadores de Helmholtz na área de estudo.

Dentre as legislações disponíveis para uso do programa SoundPLAN® trabalhou-se com a norma alemã RLS - 90. No Anexo D descreve-se alguns pontos desta norma.

A simulação foi realizada enfocando duas áreas de estudo. A primeira envolveu a área próxima à Avenida Colombo, aonde foi realizada a caracterização do ruído de tráfego. O intuito era avaliar o desempenho de barreiras acústicas simples e de ressoadores na atenuação do ruído de tráfego. A segunda etapa envolveu a região onde foram construídas as barreiras acústicas em escala. Esta etapa destinou-se a comparar os resultados com os obtidos nas medições.

Para tanto, primeiramente inseriu-se no ambiente do programa o mapa da área aonde se fez o monitoramento do ruído de tráfego, conforme se observa na Figura 4.45.

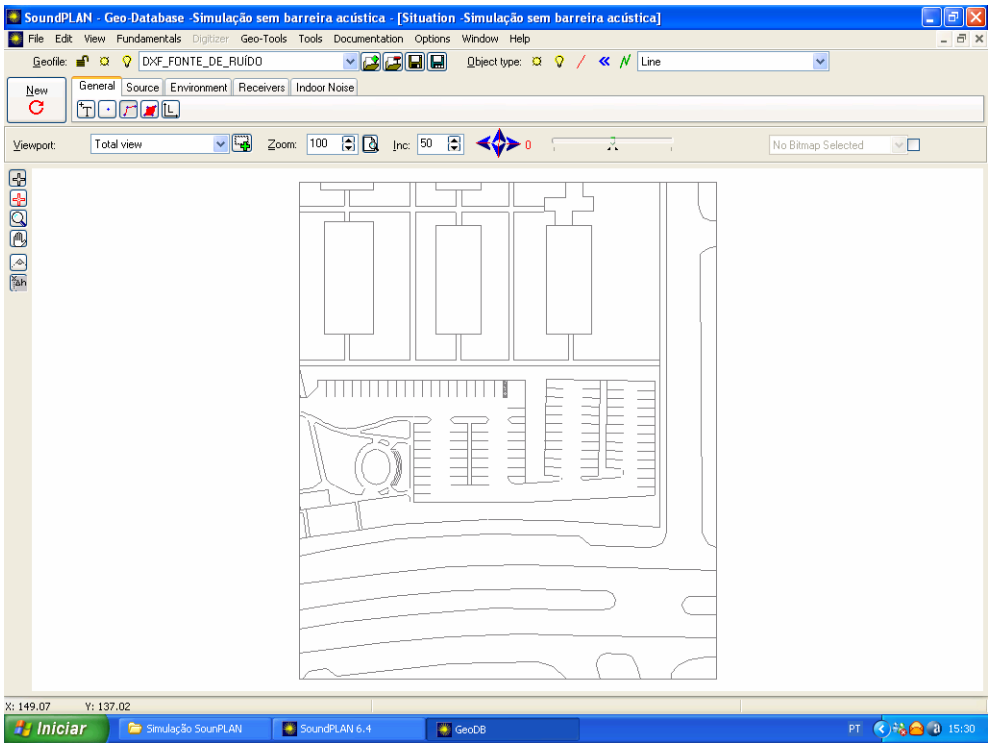


Figura 4.45 – Mapa da área de monitoramento do ruído de tráfego inserida no ambiente do programa SounPLAN®

Após, caracterizou-se cada objeto de acordo com suas propriedades. Como exemplo de objetos, citam-se as edificações, as fontes sonoras e os receptores.

As fontes sonoras foram definidas como fontes lineares, já que se trata do tráfego de veículos a uma distância de aproximadamente quinze metros do primeiro receptor, e foram caracterizadas de acordo com o espectro sonoro e a potência. O espectro de ruído gerado pela fonte sonora foi obtido a partir do monitoramento efetuado na caracterização do ruído na área de estudo e será apresentado no capítulo referente aos resultados. A potência sonora foi determinada por tentativas até obterem-se valores de NPS sonora próximos aos medidos no ponto P1 (Figura 4.4), ponto este onde foi medido o espectro sonoro.

Os receptores foram posicionados conforme a Figura 4.4, ou seja, na mesma distribuição efetuada na caracterização do ruído na área enfocada. Para cada receptor foi necessário informar o correto posicionamento bem como a altura.

A Figura 4.46 apresenta esses objetos já alterados no ambiente do programa, bem como, na parte inferior da figura, uma vista da sua elevação.

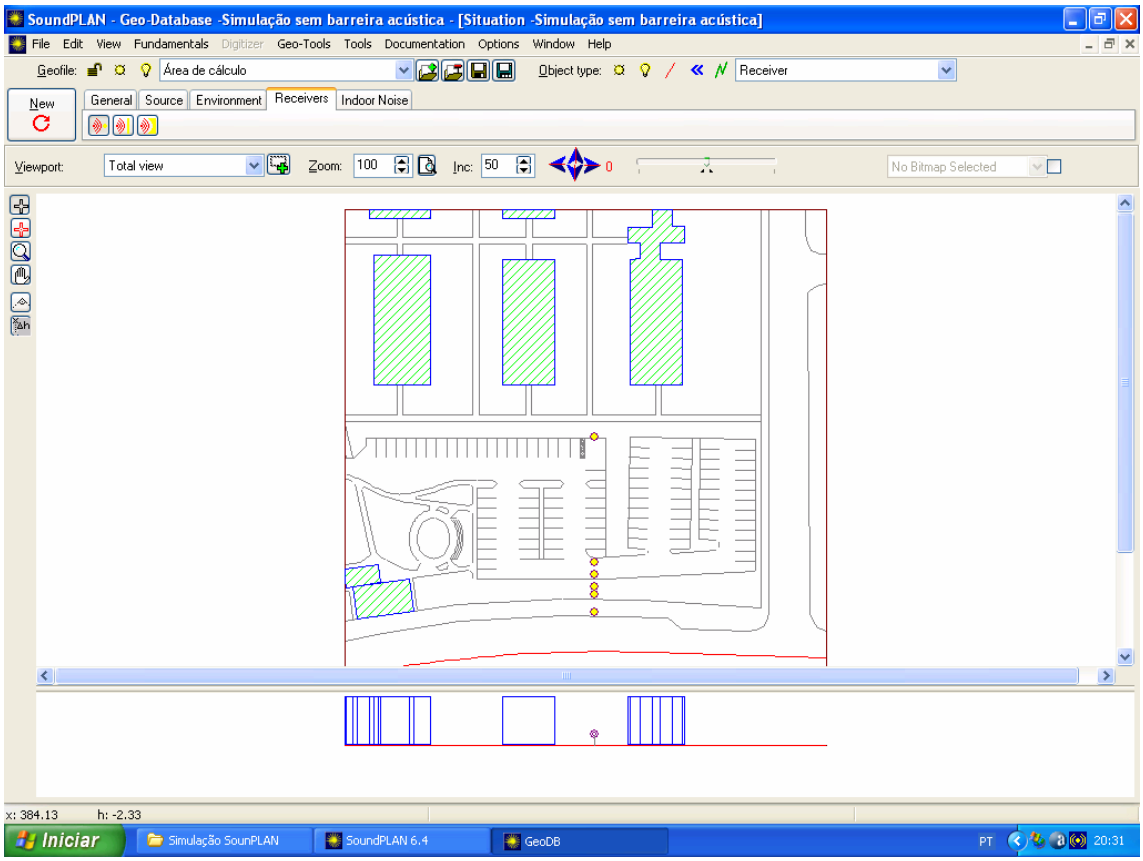


Figura 4.46 – Objetos já caracterizados no ambiente do programa SoundPLAN®

Também foram inseridas as edificações presentes na área de simulação, sendo necessário apenas fornecer suas características geométricas.

A simulação dividiu-se em três etapas. Na primeira, com a fonte sonora inserida, efetuou-se a simulação na ausência de barreira acústica com o intuito de analisar o caso real, já que não existe qualquer barreira acústica construída no local.

Na segunda etapa fez-se a inserção de uma barreira acústica construída de tijolos cerâmicos entre os pontos P1 e P2 sobre o alinhamento do alambrado. A barreia tem doze metros de extensão e seis metros de altura, estando centralizada em relação aos receptores. Foram conferidas a esta barreira características de absorção sonora de alvenaria não rebocada, características estas já disponíveis na biblioteca do programa SoundPLAN® e apresentadas na Figura 4.47. Esta barreira foi denominada *barreira simples*.

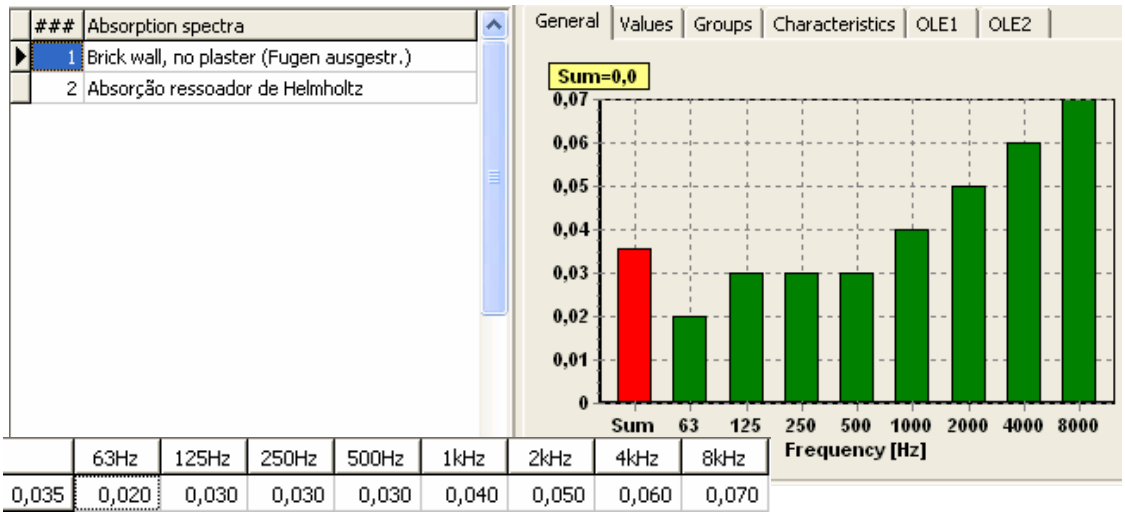


Figura 4.47 – Características de absorção sonora da barreira simples

Por fim, fez-se a inserção de uma barreira acústica na mesma posição e com as mesmas dimensões, no entanto construída com ressoadores de Helmholtz. Os valores de absorção sonora adotados para esta barreira, são os calculados a partir dos ensaios realizados em câmara reverberante. Com esta barreira fez-se a simulação de duas maneiras: a primeira com os ressoadores voltados para a fonte sonora e a segunda com os ressoadores voltados para o interior do terreno.

Na seqüência realizaram-se as simulações envolvendo a área onde foram construídas as barreiras em escala. Estas simulações foram efetuadas inserindo as barreiras, fonte sonora e receptores em tamanho real. Adotou-se esta medida para não ocorrerem acúmulos de erros, ou seja, a simulação em si, não reflete a realidade como um todo e, fazer-se simulação com elementos em escala traria maior incerteza aos resultados.

Nesta etapa das simulações conferiu-se características de absorção ao solo, já que os dados destinam-se à comparação com medições efetuadas nesta região cujo solo é recoberto de grama. Conforme é possível observar na Figura 4.48 adotou-se o fator “G”, referente à absorção do solo, igual a “1”, o que é característica de solo poroso, recoberto de ervas ou outra vegetação.

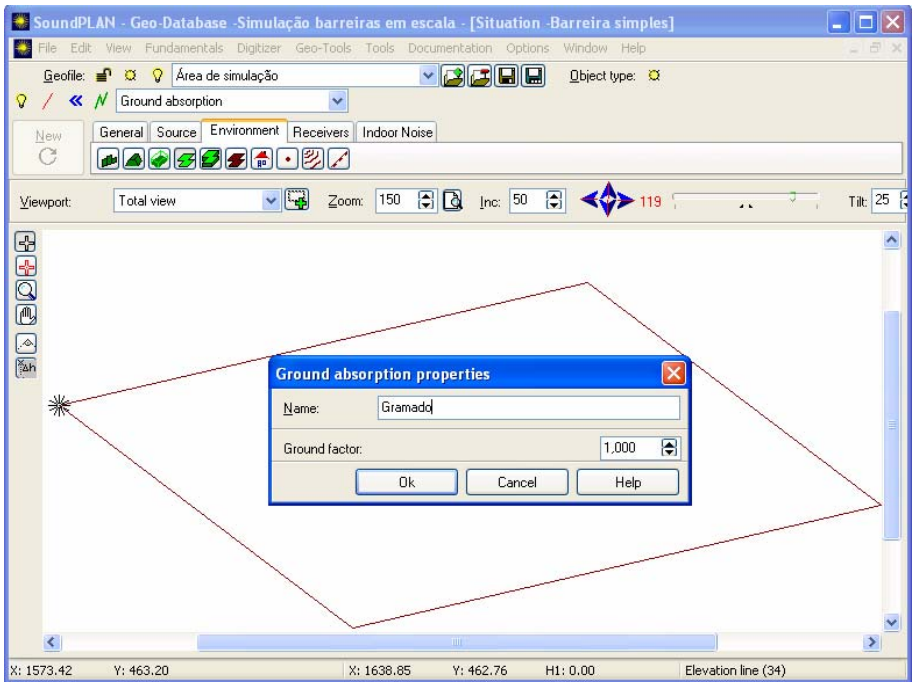


Figura 4.48 – Propriedade de absorção do solo

O terreno inserido no ambiente do programa SoundPLAN® era plano e sem qualquer edificação. Desta forma trabalhou-se com uma ilustração mais simples constituída pelo terreno, fonte sonora, receptores e barreira acústica quando a mesma era necessária. Utilizou-se fonte sonora pontual emitindo ruído rosa, conforme medições efetuadas com barreiras na escala 1:5. Na Figura 4.49 têm-se esses objetos já inseridos no programa.

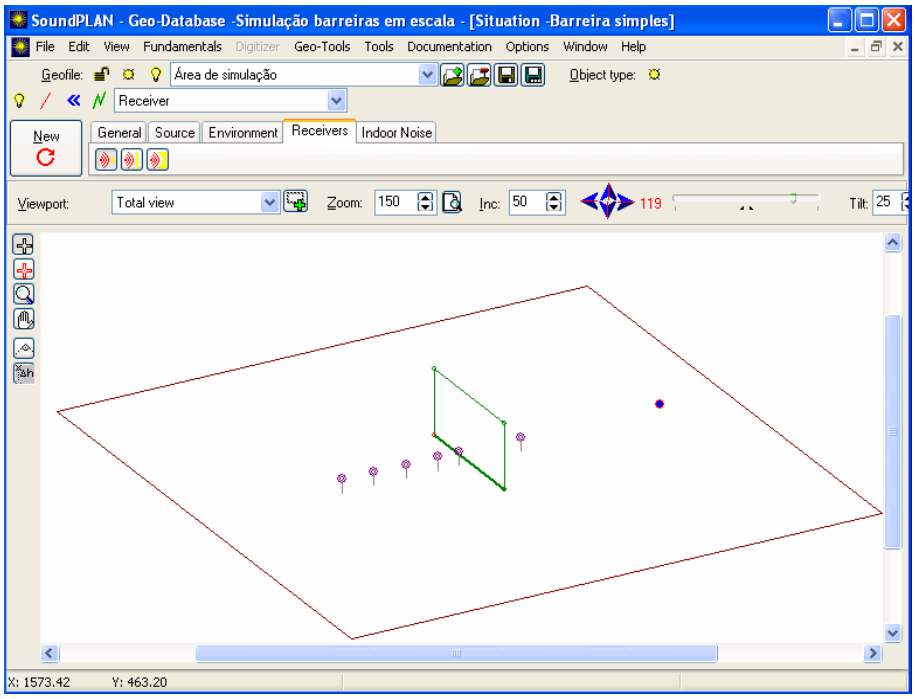


Figura 4.49 – Objetos inseridos no ambiente do programa SoundPLAN®

As simulações obedeceram a mesma ordem descrita para as simulações efetuadas em terreno próximo à Avenida Colombo:

- ✓ Sem barreira acústica.
- ✓ Com barreira acústica simples.
- ✓ Com barreira de ressoadores sendo estes voltados para a fonte sonora.
- ✓ Com barreira de ressoadores estando estes na face da barreira oposta à geração do ruído.

4.2.6 Aplicação do conceito de perda na inserção

Sabe-se que a modelagem proposta por Kurze e Anderson, como uma aproximação da curva obtida experimentalmente por Maekawa, é direcionada para o cálculo da perda na inserção para fonte pontual. A este fato adapta-se à situação criada neste trabalho para o cálculo da perda na inserção.

O cálculo foi repetido para duas situações:

- ✓ Com barreira simples.
- ✓ Com barreira de ressoadores de Helmholtz.

Consideraram-se estas duas situações devido a pequenas diferenças entre a geometria das duas barreiras provenientes da sua construção.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo foi criado nos moldes do capítulo anterior, onde se apresentaram os procedimentos adotados. O capítulo subdivide-se nos itens a seguir:

a) Características da área de estudo quanto ao NPS gerado no seu entorno e medido em pontos de interesse;

b) Dimensões dos ressoadores de Helmholtz na escala 1:5;

c) Coeficiente de absorção sonora de Sabine dos ressoadores de Helmholtz determinado em câmara reverberante;

d) Atenuação proporcionada pelas barreiras acústicas na escala 1:5 com tijolos simples e com ressoadores de Helmholtz;

e) Resultados das simulações realizadas com o programa SoundPLAN®;

f) Aplicação do conceito de perda na.

5.1.1 Características da área de estudo quando ao NPS

Na Tabela 5.1 apresentam-se os dados coletados com o medidor de NPS da 01dB® referentes ao monitoramento descrito no item 4.2.1.

Tabela 5.1 – Valores de NPS coletados com o medidor de NPS da 01dB®

Freq [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Av. Colombo 29/07/2007 (tarde)									
NPS [dB] calçada	76,2	83,2	82,8	82,3	76,1	71,8	69,0	64,0	57,6
NPS [dB] 1m	74,6	80,1	83,7	72,6	73,2	70,2	63,7	59,8	54,8
NPS [dB] 3m	74,8	83,4	78,9	73,4	69,6	66,9	62,1	55,9	50,8
NPS [dB] 6m	73,4	79,4	75,5	74,1	64,8	63,4	60,5	57,6	50,3
NPS [dB] 9m	75,0	82,5	74,5	67,1	60,3	58,5	57,3	53,2	52,1
Av. Colombo 02/07/2007 (manhã)									
NPS [dB] calçada	76,1	81,7	81,9	81,8	73,9	71,3	66,6	60,4	51,8
NPS [dB] 1m	73,1	77,9	74,5	70,0	68,7	67,6	63,7	62,9	62,6
NPS [dB] 3m	72,8	78,8	75,0	67,4	65,9	67,8	63,2	56,2	50,6
NPS [dB] 6m	71,6	77,7	77,2	68,9	63,2	63,2	61,5	54,4	52,6
NPS [dB] 9m	71,9	77,3	73,6	66,4	60,5	62,0	59,3	54,2	45,5
NPS [dB] 40m	68,6	73,4	70,4	64,1	58,1	57,4	53,9	-	-
Av. Colombo 02/07/2007 (tarde)									
NPS [dB] calçada	77,1	82,6	81,5	74,3	73,8	68,1	66,9	63,2	57,4
NPS [dB] 1m	74,5	81,1	78,3	75,9	73,0	66,4	65,3	59,6	56,7
NPS [dB] 3m	76,6	82,2	77,2	72,6	67,1	66,2	63,7	56,5	52,4
NPS [dB] 6m	75,4	79,9	75,2	66,1	60,0	59,1	57,9	55,2	54,2
NPS [dB] 9m	73,5	80,0	75,4	67,6	61,7	60,8	57,4	51,6	45,7

O ponto posicionado a 40m do alambrado no interior do terreno foi monitorado somente no dia 02/07/2007 no período da manhã. Os dados coletados neste ponto permitem a avaliação do NPS próximo às edificações, no caso, salas de aula. Conforme a Lei Complementar Nº 218/98 os NPS estão acima dos níveis admissíveis para a região.

Na Tabela 5.2 apresentam-se os dados referentes ao monitoramento descrito no item 4.2.1 coletados com o microfone omnidirecional da Beringher conectado o software TrueRTA™. Ao ler-se NPS [dB] 1m, entenda-se que este é o nível sonoro medido na calçada, a um metro do meio fio com o medidor de NPS posicionado internamente ao terreno a um metro do alambrado. O mesmo para NPS [dB] 3m, NPS [dB] 6m e NPS [dB] 9m.

Tabela 5.2 – Valores de NPS coletados com o microfone omnidirecional conectado ao software TrueRTA™

Freq [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Av. Colombo 29/07/2007 (tarde)									
NPS [dB] calçada	71,1	79,1	89,8	83,5	80,5	79,3	82,3	78,3	71,0
NPS [dB] 1m	67,6	78,6	89,4	82,3	79,1	79,8	81,7	76,9	69,3
NPS [dB] 3m	67,4	78,4	89,8	82,9	79,2	78,8	81,8	76,6	68,1
NPS [dB] 6m	67,5	77,2	88,1	83,1	80,0	78,7	81,2	77,1	69,9
NPS [dB] 9m	67,1	77,9	89,6	83,1	79,2	78,2	81,4	76,4	69,1
Av. Colombo 02/07/2007 (manhã)									
NPS [dB] calçada	68,6	76,7	88,0	81,6	78,7	78,4	81,1	75,8	67,4
NPS [dB] 1m	67,6	77,5	87,8	81,3	78,7	78,5	81,7	76,9	69,7
NPS [dB] 3m	70,6	77,4	87,6	81,6	78,4	78,2	81,2	76,4	69,0
NPS [dB] 6m	67,7	77,3	89,6	82,2	77,9	78,3	81,0	76,0	67,8
NPS [dB] 9m	71,4	78,4	87,5	81,2	77,9	77,5	80,1	75,0	67,2
Av. Colombo 02/07/2007 (tarde)									
NPS [dB] calçada	72,2	78,7	88,5	82,1	78,8	78,4	81,9	77,2	68,5
NPS [dB] 1m	69,9	78,2	88,4	82,7	78,6	77,9	81,4	76,8	68,4
NPS [dB] 3m	68,8	78,7	90,1	82,8	79,0	77,8	81,0	77,0	68,5
NPS [dB] 6m	68,4	77,2	88,4	81,3	77,3	77,2	80,7	75,5	67,1
NPS [dB] 9m	70,8	78,3	88,3	81,6	77,2	76,8	80,4	75,8	67,6

A Tabela 5.3 traz os valores de NPS obtidos com o microfone omnidirecional (valores da Tabela 5.2) já calibrados de acordo com os valores medidos com o medidor de NPS. Novamente ao ler-se NPS [dB] 1m, entenda-se que este é o nível sonoro medido na calçada, a um metro do meio fio com o medidor de NPS posicionado internamente ao terreno a um metro do alambrado. O mesmo para NPS [dB] 3m, NPS [dB] 6m e NPS [dB] 9m.

Tabela 5.3 – Valores calibrados de NPS coletados com o microfone omnidirecional conectado ao software TrueRTA™

Freq [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Av. Colombo 29/07/2007 (tarde)									
NPS [dB] 1m	72,8	82,6	82,4	81,2	74,8	72,3	68,4	62,6	55,8
NPS [dB] 3m	72,5	82,5	82,7	81,8	74,8	71,3	68,4	62,3	54,7
NPS [dB] 6m	72,6	81,3	81,1	82,0	75,7	71,1	67,9	62,8	56,5
NPS [dB] 9m	72,3	81,9	82,5	81,9	74,9	70,7	68,1	62,1	55,6
Av. Colombo 02/07/2007 (manhã)									
NPS [dB] 1m	75,1	82,5	81,6	81,4	73,9	71,4	67,2	61,5	54,1
NPS [dB] 3m	78,1	82,4	81,5	81,8	73,6	71,1	66,7	61,0	53,4
NPS [dB] 6m	75,2	82,2	83,4	82,4	73,1	71,2	66,5	60,7	52,2
NPS [dB] 9m	79,0	83,4	81,4	81,4	73,1	70,4	65,6	59,6	51,6
Av. Colombo 02/07/2007 (tarde)									
NPS [dB] 1m	74,8	82,1	81,4	74,9	73,6	67,7	66,3	62,8	57,3
NPS [dB] 3m	73,7	82,6	83,1	74,9	74,0	67,5	65,9	62,9	57,4
NPS [dB] 6m	73,3	81,1	81,4	73,5	72,4	67,0	65,6	61,5	55,9
NPS [dB] 9m	75,7	82,3	81,3	73,7	72,3	66,6	65,4	61,8	56,4

A calibração foi efetuada considerando-se que, quando o microfone omnidirecional e o medidor de NPS coletaram dados no mesmo ponto, deveriam apresentar valores iguais. No entanto isso não aconteceu e a diferença entre estes dois valores foi a correção aplicada aos dados coletados com o microfone. Desta forma, a calibração consistiu em subtrair-se dos valores coletados com o microfone omnidirecional para os pontos a 1, 3, 6 e 9m do alambrado no interior do terreno a diferença medida entre o medidor de NPS e o microfone omnidirecional quando os dois aparelhos foram posicionados no ponto P1, a um metro do meio fio.

Os valores constantes nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3 são valores médios referentes aos três momentos de coleta de dados e foram obtidos pela aplicação da Equação 5.1

$$NPS_R = 10\log\left[\frac{\sum 10^{\frac{x_n}{10}}}{n}\right] \qquad \text{(Eq. 5.1)}$$

onde:

"NPS_R" é o Nível de Pressão Sonora resultante,

"x_n" são os Níveis de Pressão Sonora,

"n" é a quantidade de dados.

Observa-se, nas mesmas tabelas, que os maiores valores de Níveis de Pressão Sonora medidos concentram-se entre as freqüências de 63, 125 e 250 Hz. Este fato confirma a característica do ruído de tráfego de ter, nas freqüências mais baixas, elevados NPS.

Na Tabela 5.4 apresentam-se os valores do espectro medido para as freqüências de interesse. Obtiveram-se estes valores também pela aplicação da Equação5.1 aos dados das Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Tabela 5.4 – Espectro da fonte sonora

Freq [Hz]	**63**	**125**	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**	**8k**
NPS [dB]	82,5	82,1	80,6	74,7	70,7	67,6	62,8	56,3

De acordo com a explanação feita anteriormente no que diz respeito à propagação de ondas sonoras de grandes e pequenos comprimentos de onda em relação aos obstáculos, sabe-se que o ruído proveniente da fonte sonora caracterizada tem grande capacidade de difração. Uma barreira acústica dimensionada para absorver o ruído nas freqüências em destaque possivelmente traria benefícios no que se refere à qualidade sonora dos ambientes próximos a tais fontes. Portanto, é interessante que se considere, além da atenuação proporcionada pela barreira devido à difração sonora, também a atenuação proporcionada pela absorção da barreira. Barreiras acústicas de ressoadores de Helmholtz apresentam-se como uma boa alternativa para tal aplicação.

Na Tabela 5.5 apresentam-se valores de atenuação verificada nos pontos a um metro, três, seis e nove metros do alambrado. Esta atenuação foi calculada fazendo-se a diferença entre medições simultâneas, como por exemplo, com o medidor de NPS a três metros do alambrado no interior do terreno e com o microfone omnidirecional na calçada a um metro da via. Portanto, neste caso a atenuação, conforme citado anteriormente, é calculada pela subtração do "NPS em um ponto na face da barreira acústica voltada para a fonte sonora" menos "NPS medido em pontos pré-determinados na face da barreira oposta à geração do ruído".

Tabela 5.5 – Atenuação sonora verificada

Freq [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Av. Colombo 29/07/2007 (tarde)									
Atenuação 1m	-1,8	2,5	-1,3	8,6	1,6	2,1	4,7	2,8	1,0
Atenuação 3m	-2,3	-0,9	3,8	8,4	5,2	4,4	6,3	6,4	3,9
Atenuação 6m	-0,8	1,9	5,6	7,9	10,9	7,7	7,4	5,2	6,2
Atenuação 9m	-2,7	-0,6	8,0	14,8	14,6	12,2	10,8	8,9	3,5
Av. Colombo 02/07/2007 (manhã)									
Atenuação 1m	2,0	4,6	7,1	11,4	5,2	3,8	3,5	-1,4	-8,5
Atenuação 3m	5,3	3,6	6,5	14,4	7,7	3,3	3,5	4,8	2,8
Atenuação 6m	3,6	4,5	6,2	13,5	9,9	8,0	5,0	6,3	-0,4
Atenuação 9m	7,1	6,1	7,8	15,0	12,6	8,4	6,3	5,4	6,1
Av. Colombo 02/07/2007 (tarde)									
Atenuação 1m	0,3	1,0	3,1	-1,0	0,6	1,3	1,0	3,2	0,6
Atenuação 3m	-2,9	0,4	5,9	2,3	6,9	1,3	2,2	6,4	5,0
Atenuação 6m	-2,1	1,2	6,2	7,4	12,4	7,9	7,7	6,3	1,7
Atenuação 9m	2,2	2,3	5,9	6,1	10,6	5,8	8,0	10,2	10,7

Na Tabela 5.5 observam-se alguns valores negativos, ou seja, ao invés de acontecer uma atenuação com o distanciamento da fonte, obteve-se um aumento do NPS, principalmente na freqüência de 31,5Hz. Acredita-se que estes valores devem-se às reflexões ocasionadas pela existência de árvores, edificações ou talvez à geração de ruído em uma via perpendicular à Avenida Colombo e também próxima aos locais de monitoramento, a Rua Dep. Ardinal Ribas indicada na Figura 4.4.

Ainda fazendo referência à atenuação do NPS com o distanciamento da fonte, observa-se que, para as freqüências médias e altas, obtiveram-se valores maiores de atenuação, enquanto que nas freqüências mais baixas isso não ocorreu. Vislumbra-se novamente a possibilidade de bons resultados com a utilização de ressoadores de Helmholtz em barreiras acústicas para a absorção de sons de baixa freqüência.

5.1.2 Dimensões dos ressoadores de Helmholtz em escala 1:5

Devido aos valores obtidos no monitoramento de ruído cujos resultados foram apresentados no item anterior, optou-se por direcionar o dimensionamento do ressoador de Helmholtz para uma freqüência entre 125 e 250Hz. Esta será a freqüência de oscilação do ressoador, ou seja, a freqüência de maior absorção.

Sabe-se que utilizar modelos para estudos na área de acústica implica em assumir riscos quanto à qualidade dos resultados obtidos. Em qualquer área de estudo só é possível realizar experimentos considerando algumas simplificações. Na acústica não é diferente, sendo este fato de maior importância quando se trata de modelos.

No entanto, devido a fatores de ordem prática, foi necessário que se trabalhasse neste estudo com ressoadores na escala 1:5. Mesmo sabendo que os resultados não são fiéis à realidade entende-se que dão uma boa perspectiva do desempenho das peças em questão.

A forma do ressoador de Helmholtz fabricado foi adotada tendo em vista a necessidade de, no cálculo da freqüência de oscilação, atingir-se um valor entre 125 e 250Hz. Buscou-se formar um conjunto de uma passagem de ar suficientemente longa associada a um volume de ar interno que atendesse a esta necessidade. Além destas características determinou-se também a modulação que deveria ser seguida no assentamento dos ressoadores, ou seja, se todas as peças teriam a abertura do "gargalo" ou se seria necessário intercalar estas aberturas para obter volumes internos maiores. As dimensões finais em centímetros da peça cerâmica na escala são apresentadas na Figura 5.1.

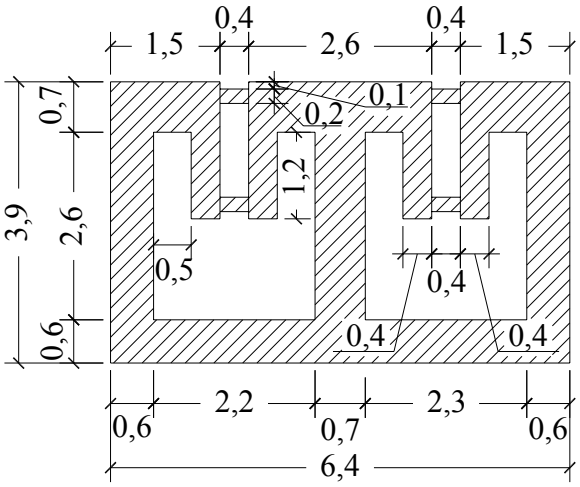


Figura 5.1 – Ressoador de Helmholtz na escala 1:5

Para a confecção da boquilha, consideraram-se as medidas da Figura 5.1 9% maiores. Isto se deve à retração que as peças cerâmicas sofrem durante a secagem e a queima.

Ainda na Figura 5.1 observa-se a passagem de ar criada, o "gargalo da garrafa". Na entrada desta passagem e na transição da passagem para o volume de ar interno, têm-se paredes de cerâmica de dois milímetros de espessura. Conforme detalhado nas Figuras 4.18 e 4.19 somente uma das passagens foi aberta em cada peça. Quando as peças cerâmicas foram

assentadas intercalaram-se as aberturas conforme ilustra a Figura 5.2. Esta foi a modulação adotada.

Figura 5.2 – Posicionamento das aberturas dos ressoadores

Optou-se por esta conformação de construção da barreira por ela permitir um volume maior no interior do ressoador e assim atingir-se a freqüência de oscilação desejada. O volume considerado para o cálculo da freqüência de oscilação dos ressoadores é o ilustrado na Figura 5.3.

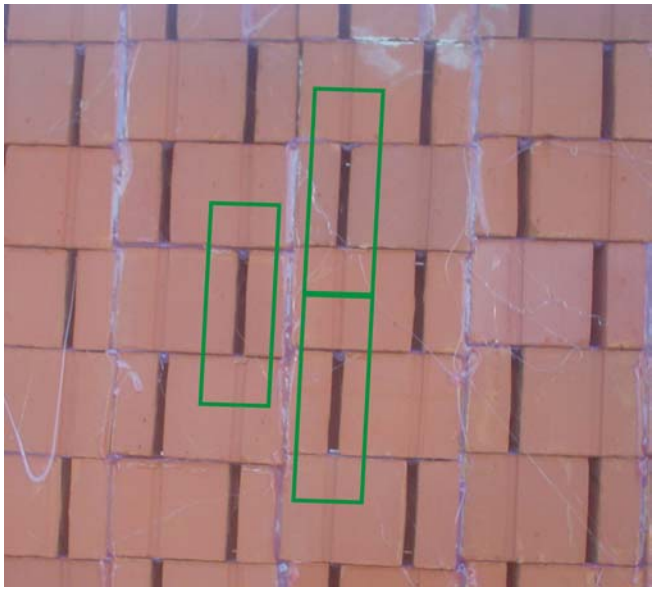


Figura 5.3 – Volume do ressoador

Na Figura 5.3 observam-se três retângulos sendo que cada um representa o volume de um ressoador.

Desta forma calculou-se a freqüência de oscilação do conjunto por meio da Equação 3.14 considerando a velocidade do ar à 20ºC:

$$f = \frac{344}{2 * \pi}\sqrt{\frac{0{,}004}{0{,}0008 * 0{,}019}} = 888{,}2Hz$$

Como a peça está na escala 1:5, também se deve considerar esta escala para os comprimentos de onda. Sabe-se que para o protótipo (barreira acústica em tamanho real) tem-se $\lambda_p = \frac{c}{f_p}$ e, para o modelo (barreira acústica na escala 1:5), $\lambda_m = \frac{c}{f_m}$. Se a escala do modelo é 1:5, então se pode afirmar o seguinte:

$$\frac{1}{5} = \frac{\lambda_m}{\lambda_p} \Rightarrow \frac{1}{5} = \frac{c}{f_m} * \frac{1}{\frac{c}{f_p}} = \frac{f_p}{f_m}$$

$$\therefore f_p = \frac{f_m}{5}$$

Portanto a freqüência calculada deve ser dividida por 5 (cinco), o que significa que se estará aumentando cinco vezes o comprimento de onda da onda sonora e desta forma ter-se-á a freqüência de oscilação do protótipo. Logo, a freqüência de oscilação de um ressoador de Helmholtz cerâmico em tamanho real seria de 177,6Hz, valor este que se encontra dentro da faixa de interesse para o ruído de tráfego monitorado.

5.1.3 Coeficiente de absorção sonora de Sabine dos ressoadores de Helmholtz determinado em câmara reverberante

Para a determinação do coeficiente de absorção sonora de Sabine de ressoadores em tamanho real, seria necessária uma área de 10 a 12m^2 de material a ser testado conforme recomendação da ISO 354. Como se está trabalhando em escala, esta área pode ser reduzida levando em consideração a semelhança geométrica entre modelo e protótipo. Portanto tem-se o equacionamento a seguir:

$$\lambda = \frac{L_{MODELO}}{L_{PROTÓTIPO}}$$

$$se \quad \lambda = \frac{1}{5} \quad \text{então} \quad \frac{1}{5} = \frac{L_{MODELO}}{L_{PROTÓTIPO}}$$

$$\therefore L_{PROTÓTIPO} = 5 * L_{MODELO}$$

Então, considerando-se que a área do protótipo seria de $12m^2$, pode-se afirmar que a área necessária ao modelo será de $2,4m^2$.

Distribuíram-se as peças da seguinte maneira: no sentido do comprimento dos ressoadores colocaram-se 23 (vinte e três) peças, o que somou um total de aproximadamente 1,47m (um metro e quarenta e sete centímetros); no sentido da altura dos ressoadores colocaram-se 46 (quarenta e seis) peças, o que somou um total de aproximadamente 1,75m (um metro e setenta e cinco centímetros). A área resultante foi de cerca de $2,57m^2$, atendendo ao necessário para esta situação.

Também é recomendação da ISO 354 que o volume da câmara reverberante não seja inferior a $150m^3$. A câmara utilizada tem um volume de $71,8m^3$. Considerando que as medições em câmara reverberante foram realizadas ensaiando modelos, pode-se também aplicar o fator de escala ao volume requerido para a câmara. Logo, a câmara acústica em questão atende às exigências do ensaio no que diz respeito ao seu volume.

Apresenta-se na Tabela 5.6 a média dos tempos de reverberação medidos na câmara reverberante para a sala com painel de ressoadores sem vedação das juntas, painel de ressoadores com vedação das juntas e sem painel de ressoadores. Os valores medidos para cada um dos quatro pontos de coleta de dados e para as duas posições de fonte sonora em cada situação do painel constam no Apêndice A.

Tabela 5.6 – Tempos de reverberação medidos na câmara reverberante

Freqüência [Hz]	Tempo de reverberação médio [s]		
	Painel de ressoadores sem vedação das juntas	Painel de ressoadores com vedação das juntas	Sem painel
63	12,95	12,09	13,87
80	12,99	12,24	13,86
100	11,47	11,72	12,72
125	8,09	8,10	8,86
160	8,53	8,83	9,69
200	8,71	8,92	10,70
250	7,33	7,39	8,20
315	6,13	5,92	6,79
400	5,64	5,51	6,53
500	5,05	4,89	5,57
630	3,75	3,64	4,31
800	2,84	2,64	3,51
1 k	2,39	2,48	3,48
1,25 k	2,45	2,70	3,40
1,6 k	2,71	2,95	3,53
2 k	2,50	2,63	3,04
2,5 k	2,56	2,62	2,83
3,15 k	2,47	2,51	2,69
4 k	2,26	2,27	2,50
5 k	2,02	2,06	2,12
6,3 k	1,65	1,67	1,77
8 k	1,35	1,32	1,47
10 k	1,13	1,08	1,18

O Gráfico 5.1 ilustra com maior clareza os tempos de reverberação apresentados na Tabela 5.6.

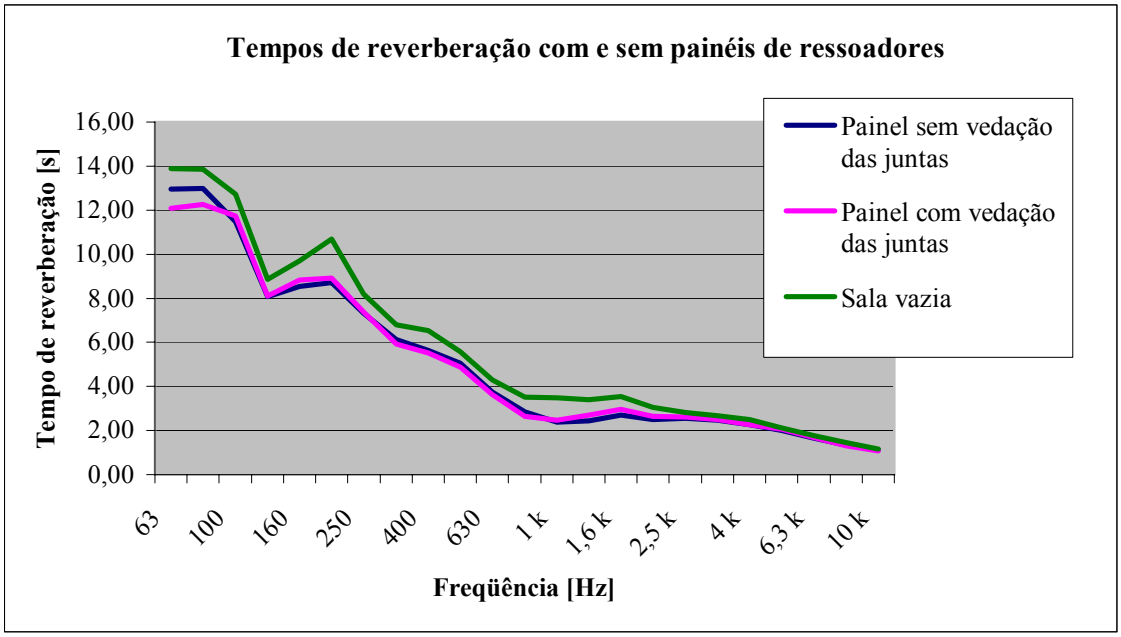


Gráfico 5.1 – Tempos de reverberação

Os valores de temperatura e umidade relativa foram coletados a cada dez minutos. Todos os dados coletados também se encontram no Apêndice A. A temperatura média na câmara reverberante durante todos os ensaios foi de 26,5ºC com um desvio relativo de 1,5% e, a umidade relativa foi em média de 69,2% com um desvio de 7,9%. Observa-se que houve pouca variação destes valores durante o período de medição e entende-se que as duas variáveis em questão não afetaram de forma significativa os resultados obtidos a partir dos ensaios em câmara reverberante.

Calculou-se o coeficiente de absorção sonora de Sabine aplicando a Equação 3.15 aos valores de tempo de reverberação da Tabela 5.6. A Equação 3.15 é apresentada novamente a seguir:

$$\alpha_{Sab} = 0{,}161\frac{V}{S}\left(\frac{1}{T_{60}} - \frac{1}{T'_{60}}\right)$$

Os valores dos coeficientes de absorção sonora de Sabine obtidos constam na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Coeficientes de absorção sonora de Sabine

Freqüência [Hz]	Coeficiente de absorção sonora de Sabine	
	Painel de ressoadores sem vedação das juntas	Painel de ressoadores com vedação das juntas
63	0,02	0,05
80	0,02	0,04
100	0,04	0,03
125	0,05	0,05
160	0,06	0,04
200	0,10	0,08
250	0,07	0,06
315	0,07	0,10
400	0,11	0,13
500	0,08	0,11
630	0,16	0,19
800	0,30	0,42
1 k	0,59	0,52
1,25 k	0,51	0,34
1,6 k	0,39	0,25
2 k	0,32	0,23
2,5 k	0,17	0,13
3,15 k	0,15	0,12
4 k	0,19	0,18
5 k	0,11	0,07
6,3 k	0,18	0,14
8 k	0,27	0,34
10 k	0,15	0,34

Por meio dos valores dos coeficientes de absorção sonora de Sabine da Tabela 5.7, percebe-se que o fato de vedar-se as juntas do painel de ressoadores resultou em uma pequena diminuição da absorção sonora do painel. Como as barreiras acústicas em escala foram construídas com vedação das juntas, serão utilizados nas simulações os valores de absorção referentes ao painel de ressoadores com as juntas vedadas.

Devido ao pequeno volume da sala é importante que se despreze os valores obtidos para freqüências inferiores a 100Hz. Conforme o procedimento descrito a seguir referente à escala dos ressoadores, os tempos de reverberação para freqüências abaixo de 31,5Hz foram desprezados.

Para obter a curva de absorção sonora de Sabine para ressoadores em tamanho real, dividiram-se as freqüências por cinco, valor este referente à escala utilizada onde $f_p = \frac{f_m}{5}$. Desta forma obteve-se a Tabela 5.8 que traz os valores de absorção sonora que caracterizam os ressoadores em estudo quanto à sua capacidade de absorver ruídos em uma faixa específica de freqüências conforme o seu dimensionamento.

Tabela 5.8 – Coeficientes de absorção sonora de Sabine para ressoadores em tamanho real

Freqüência [Hz]	Coeficiente de absorção sonora de Sabine	
	Painel de ressoadores sem vedação das juntas	Painel de ressoadores com vedação das juntas
63	0,07	0,10
80	0,11	0,13
100	0,08	0,11
125	0,16	0,19
160	0,30	0,42
200	0,59	0,52
250	0,51	0,34
315	0,39	0,25
400	0,32	0,23
500	0,17	0,13
630	0,15	0,12
800	0,19	0,18
1 k	0,11	0,07
1,25 k	0,18	0,14
1,6 k	0,27	0,34
2 k	0,15	0,34

Para uma melhor visualização dos dados da Tabela 5.8 construiu-se o Gráfico 5.2.

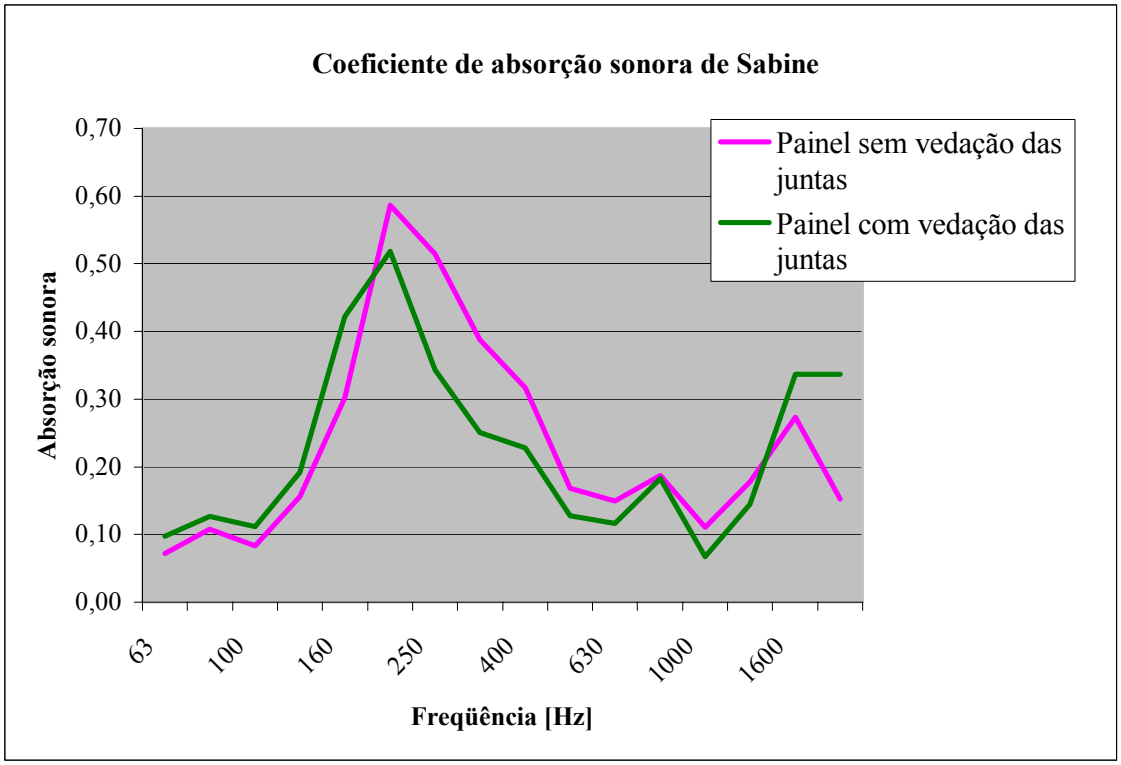


Gráfico 5.2 – Coeficientes de absorção sonora de Sabine para ressoadores em tamanho real

Observa-se nos dados da Tabela 5.8 e no Gráfico 5.2 que em torno da freqüência de 200Hz ocorre um aumento significativo da absorção sonora dos ressoadores sendo isso mais acentuado para o painel de ressoadores sem vedação das juntas. Esta freqüência aproxima-se bastante daquela calculada quando do dimensionamento do ressoador em escala. Isto significa que os ressoadores trabalham conforme esperado. Esta variação entre o valor da freqüência de pico de absorção calculada e medida pode ser atribuída às variações nas dimensões dos ressoadores bem como a falhas na montagem do painel.

Chama-se a atenção para um acréscimo de absorção sonora dos ressoadores nas freqüências em torno de 1600Hz. Acredita-se que este acréscimo deva-se à formação de um segundo volume na região do ressoador análoga ao "gargalo da garrafa" conforme ilustra a parte listrada da Figura 5.4 e, conseqüentemente, verifica-se uma segunda freqüência de oscilação do sistema.

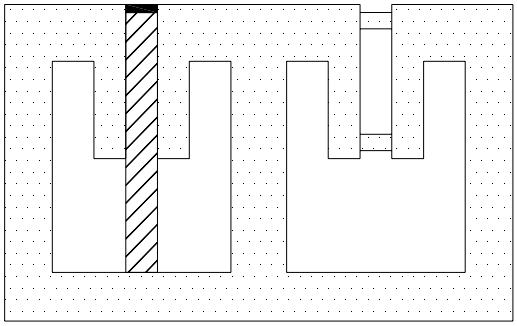


Figura 5.4 – Ressoador de Helmholtz: formação de um segundo volume

Efetuando-se o cálculo da freqüência de oscilação deste volume e considerando-se o comprimento do novo gargalo muito pequeno, um milímetro, como se pode observar na Figura 5.4 a parte pintada de preto, chega-se ao exposto a seguir.

$$f = \frac{344}{2 * \pi}\sqrt{\frac{0{,}004}{0{,}0002 * 0{,}001}} = 7742{,}9Hz$$

$$\Rightarrow \frac{7742{,}9Hz}{5} = 1548{,}6Hz$$

Observa-se que, como o comprimento do "gargalo" é mínimo, a Equação 3.14 empregada para o cálculo da freqüência crítica foi utilizada, neste exemplo, de forma aproximada. No entanto, este é um ponto a ser avaliado com mais detalhes já que seria de grande valia poder-se dimensionar uma única peça que tivesse a absorção sonora acentuada em duas freqüências, com por exemplo, uma baixa e outra média freqüência.

5.1.4 Atenuação proporcionada pelas barreiras acústicas na escala 1:5 com tijolos simples e com ressoadores de Helmholtz

Os valores coletados durante o monitoramento das barreiras acústicas em escala constam no Apêndice B. A calibração dos dados foi efetuada da mesma forma que no item 5.1.1, a partir da medição em que o microfone omnidirecional e os medidores de NPS foram posicionados no mesmo ponto.

Na Tabela 5.9, são apresentados os valores de atenuação medida.

Tabela 5.9 – Atenuação sonora verificada: 21/12/2007

Freqüência [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Sem barreira acústica									
NPS [dB] 0,20m	-4,3	1,4	3,3	3,2	3,5	4,1	2,4	2,7	1,2
NPS [dB] 0,60m	-0,7	2,2	4,9	4,9	3,8	5,1	7,1	5,2	1,4
NPS [dB] 1,20m	-3,1	1,4	5,1	5,2	4,2	5,1	7,0	6,1	1,2
NPS [dB] 1,80m	-3,1	1,2	5,8	5,4	2,2	4,8	9,1	7,2	2,8
NPS [dB] 2,40m	-3,2	0,4	6,2	6,5	5,5	6,6	10,8	8,5	3,3
Barreira acústica simples									
NPS [dB] 0,20m	0,2	-1,1	11,7	12,9	16,5	21,7	21,5	33,9	31,0
NPS [dB] 0,60m	0,9	4,2	10,0	11,7	15,3	21,2	21,0	29,8	30,6
NPS [dB] 1,20m	-0,1	-1,6	8,8	10,2	15,9	22,5	18,9	27,1	29,5
NPS [dB] 1,80m	1,1	2,7	9,9	9,9	15,3	24,7	20,6	30,5	27,8
NPS [dB] 2,40m	0,0	2,0	10,2	10,4	12,8	25,0	21,1	30,3	28,3
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora									
NPS [dB] 0,20m	-0,1	2,4	13,4	10,9	19,5	22,4	21,5	33,3	32,0
NPS [dB] 0,60m	-1,1	-1,8	11,5	12,1	17,2	20,3	23,3	32,6	31,3
NPS [dB] 1,20m	-4,5	1,4	10,7	10,5	16,9	24,6	20,2	30,2	29,2
NPS [dB] 1,80m	-1,0	3,0	11,0	9,1	17,2	23,8	22,4	28,2	26,3
NPS [dB] 2,40m	-2,6	1,4	10,6	9,6	15,0	22,0	22,3	29,9	26,9
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores									
NPS [dB] 0,20m	3,5	1,0	11,6	11,3	15,8	20,0	23,1	31,3	33,5
NPS [dB] 0,60m	5,5	2,3	11,6	13,3	18,3	19,8	22,7	30,2	30,6
NPS [dB] 1,20m	6,2	2,1	10,4	12,8	18,6	21,1	21,8	30,0	29,7
NPS [dB] 1,80m	0,9	-1,6	10,3	10,9	15,7	22,1	23,3	31,6	29,7
NPS [dB] 2,40m	0,7	0,4	10,0	10,9	16,2	23,4	23,6	31,3	30,5

Aos valores da Tabela 5.9 ainda é necessário atribuir-se o efeito da escala. Faz-se isso multiplicando as distâncias dos receptores por cinco e dividindo as freqüências por este mesmo valor, de forma a aumentar o comprimento de onda conforme demonstrado anteriormente. O resultado é apresentado na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Atenuação sonora verificada: valores corrigidos

Freqüência [Hz]	6,3	12,6	25	50	100	200	400	800	1600
Sem barreira acústica									
NPS [dB] 1m	-4,3	1,4	3,3	3,2	3,5	4,1	2,4	2,7	1,2
NPS [dB] 3m	-0,7	2,2	4,9	4,9	3,8	5,1	7,1	5,2	1,4
NPS [dB] 6m	-3,1	1,4	5,1	5,2	4,2	5,1	7,0	6,1	1,2
NPS [dB] 9m	-3,1	1,2	5,8	5,4	2,2	4,8	9,1	7,2	2,8
NPS [dB] 12m	-3,2	0,4	6,2	6,5	5,5	6,6	10,8	8,5	3,3
Barreira acústica simples									
NPS [dB] 1m	0,2	-1,1	11,7	12,9	16,5	21,7	21,5	33,9	31,0
NPS [dB] 3m	0,9	4,2	10,0	11,7	15,3	21,2	21,0	29,8	30,6
NPS [dB] 6m	-0,1	-1,6	8,8	10,2	15,9	22,5	18,9	27,1	29,5
NPS [dB] 9m	1,1	2,7	9,9	9,9	15,3	24,7	20,6	30,5	27,8
NPS [dB] 12m	0,0	2,0	10,2	10,4	12,8	25,0	21,1	30,3	28,3
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora									
NPS [dB] 1m	-0,1	2,4	13,4	10,9	19,5	22,4	21,5	33,3	32,0
NPS [dB] 3m	-1,1	-1,8	11,5	12,1	17,2	20,3	23,3	32,6	31,3
NPS [dB] 6m	-4,5	1,4	10,7	10,5	16,9	24,6	20,2	30,2	29,2
NPS [dB] 9m	-1,0	3,0	11,0	9,1	17,2	23,8	22,4	28,2	26,3
NPS [dB] 12m	-2,6	1,4	10,6	9,6	15,0	22,0	22,3	29,9	26,9
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores									
NPS [dB] 1m	3,5	1,0	11,6	11,3	15,8	20,0	23,1	31,3	33,5
NPS [dB] 3m	5,5	2,3	11,6	13,3	18,3	19,8	22,7	30,2	30,6
NPS [dB] 6m	6,2	2,1	10,4	12,8	18,6	21,1	21,8	30,0	29,7
NPS [dB] 9m	0,9	-1,6	10,3	10,9	15,7	22,1	23,3	31,6	29,7
NPS [dB] 12m	0,7	0,4	10,0	10,9	16,2	23,4	23,6	31,3	30,5

Analisando a Tabela 5.10, percebe-se que, para as freqüências a partir de 200Hz ocorre uma atenuação mais acentuada em relação às freqüências mais baixas. No entanto, não há uma freqüência de destaque como se esperava ao medir-se a atenuação proporcionada por barreiras construídas com ressoadores de Helmholtz, sejam eles voltados para a fonte ou para os receptores. A partir de 800Hz a atenuação verificada foi ainda maior, mas com pouca variação entre a atenuação proporcionada pela barreira simples e pela barreira de ressoadores, considerando-se a análise desta última com os ressoadores voltados para a fonte e para os receptores conforme se pode observar na Tabela 5.11. A partir desta tabela serão descartados os valores de NPS para as freqüências inferiores a 50Hz.

Tabela 5.11 – Variação da atenuação em relação à barreira acústica simples

Freqüência [Hz]	50	100	200	400	800	1600
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora						
NPS [dB] 1m	-2,0	3,1	0,8	0,0	-0,7	1,0
NPS [dB] 3m	0,4	1,9	-0,9	2,2	2,9	0,7
NPS [dB] 6m	0,3	1,1	2,1	1,3	3,1	-0,3
NPS [dB] 9m	-0,9	1,9	-0,9	1,8	-2,3	-1,5
NPS [dB] 12m	-0,8	2,2	-3,0	1,3	-0,4	-1,4
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores						
NPS [dB] 1m	-1,7	-0,7	-1,6	1,6	-2,6	2,5
NPS [dB] 3m	1,5	3,0	-1,4	1,6	0,4	-0,1
NPS [dB] 6m	2,6	2,7	-1,4	2,9	2,9	0,3
NPS [dB] 9m	1,0	0,4	-2,6	2,7	1,1	1,8
NPS [dB] 12m	0,5	3,4	-1,6	2,5	1,1	2,2

Os valores negativos na Tabela 5.11 representam um aumento do NPS medido em relação à barreira acústica simples. Mesmo os resultados não sendo os esperados, foi possível verificar um pequeno aumento da atenuação proporcionada pela barreira construída com ressoadores de Helmholtz.

Comparam-se também os valores de atenuação proporcionada pela barreira de ressoadores estando estes voltados para a fonte e para os receptores (Tabela 5.12).

Tabela 5.12 – Variação da atenuação entre barreira com ressoadores voltados para a fonte e para os receptores

Freqüência [Hz]	50	100	200	400	800	1600
NPS [dB] 1m	-0,3	3,7	2,4	-1,6	1,9	-1,5
NPS [dB] 3m	-1,2	-1,1	0,5	0,6	2,4	0,8
NPS [dB] 6m	-2,3	-1,7	3,5	-1,6	0,2	-0,6
NPS [dB] 9m	-1,9	1,5	1,7	-0,9	-3,4	-3,3
NPS [dB] 12m	-1,3	-1,2	-1,4	-1,3	-1,5	-3,6

Na Tabela 5.12 os valores negativos significam que a barreira com ressoadores voltados para a fonte foi capaz de proporcionar maior atenuação, enquanto que, valores positivos significam que a barreira com ressoadores voltados para os receptores foi capaz de proporcionar maior atenuação. Observa-se que os valores são aleatórios e não permitem avaliar com clareza o desempenho das barreiras testadas.

É importante lembrar que as condições deste ensaio não foram as ideais. O equipamento utilizado foi adaptado para a situação em escala e o local onde as barreiras foram construídas não era totalmente silencioso. É possível que tenham ocorrido reflexões devido ao tamanho do equipamento utilizado nas medições, equipamentos estes que eram grandes se comparados às barreiras acústicas; fato este que implicou em um erro sistemático. Além disso ressaltam-se as dificuldades de trabalhar com modelos acústicos. Realizou-se o ensaio como uma alternativa para a verificação na prática dos benefícios oferecidos por barreiras acústicas construídas com ressoadores de Helmholtz já que não foi possível construir estas barreiras em tamanho real.

5.1.5 Resultados das simulações realizadas com o programa SoundPLAN®

Conforme mencionado anteriormente, os valores de absorção sonora utilizados para os ressoadores de Helmholtz durante as simulações foram os calculados a partir de medições de tempo de reverberação em câmara reverberante, quando a amostra testada estava com as juntas vedadas. Na Tabela 5.13 apresentam-se estes valores de absorção sonora.

Tabela 5.13 – Absorção sonora de Sabine dos ressoadores de Helmholtz

Freqüência [Hz]	**63**	**80**	**100**	**125**	**160**	**200**	**250**	**315**
Absorção sonora	0,10	0,13	0,11	0,19	0,42	0,52	0,34	0,25
Freqüência [Hz]	**400**	**500**	**630**	**800**	**1k**	**1,25k**	**1,6k**	**2k**
Absorção sonora	0,23	0,13	0,12	0,18	0,07	0,14	0,34	0,34

Na Figura 5.5 é possível observar estes valores já inseridos na biblioteca do programa SoundPLAN®.

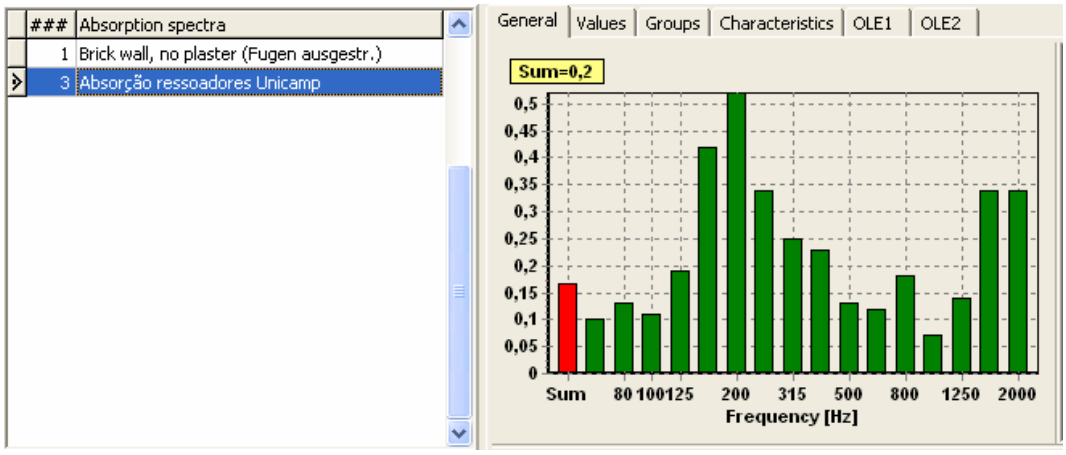


Figura 5.5 – Características de absorção da barreira de ressoadores de Helmholtz

Resultados das simulações realizadas na área próxima à Avenida Colombo

Dos valores de pressão sonora coletados na caracterização do ruído na área de estudo extraiu-se o espectro do ruído gerado pelo tráfego, o qual foi inserido como característica da fonte sonora linear na simulação. Estes valores são apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Espectro da fonte sonora

Freq [Hz]	**31,5**	**63**	**125**	**250**	**500**	**1k**	**2k**	**4k**	**8k**	**NPS (Global)**	**87,4**
NPS [dB]	76,5	82,5	82,1	80,6	74,7	70,7	67,6	62,8	56,3		

Os valores do espectro apresentado foram medidos na calçada a um metro do meio-fio. No processo da simulação variou-se a potência da fonte sonora até atingir-se valores próximos a estes neste mesmo ponto.

A Figura 5.6 traz o resultado da simulação efetuada sem barreira acústica.

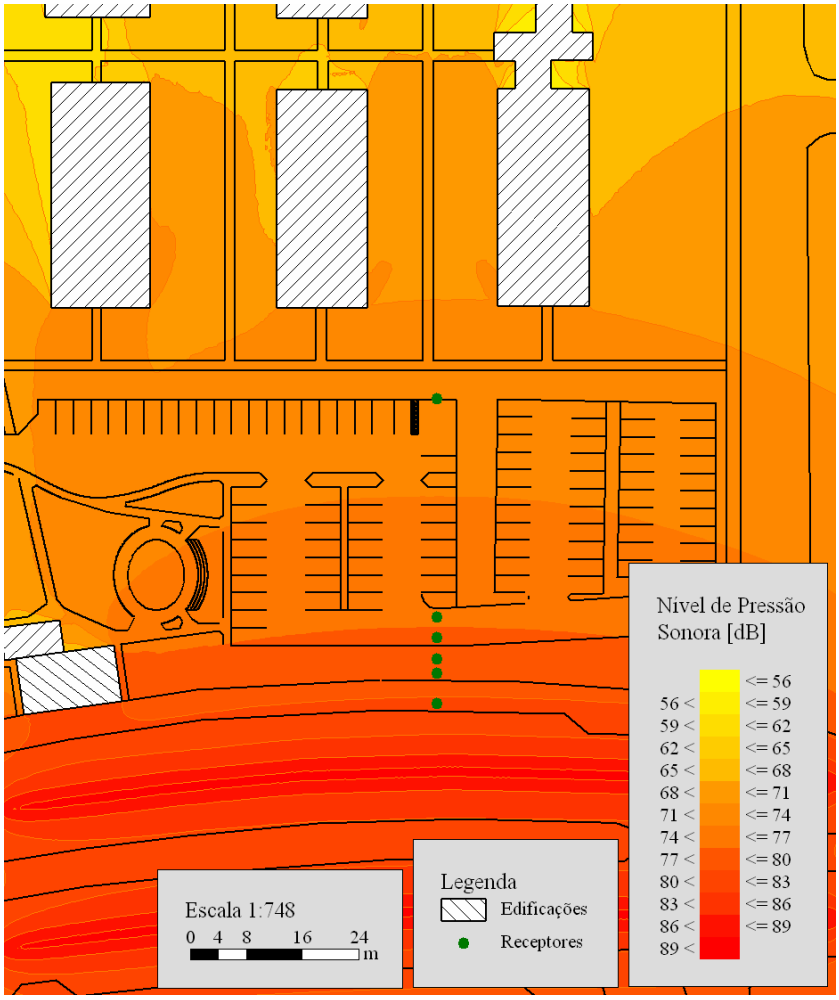


Figura 5.6 – Resultado da simulação sem barreira acústica: valores em dB

Os valores apresentados na Figura 5.6 são medidos em dB e pode-se observar que conforme acontece o afastamento dos receptores em relação à fonte sonora diminuem os Níveis de Pressão Sonora. Os valores obtidos representados na escala de cores aproximam-se dos valores medidos e apresentados na Tabela 5.1. Salienta-se que já é possível perceber o efeito da sombra acústica ocasionado no entorno das edificações, sendo que estas também atuam como barreiras acústicas interferindo na propagação das ondas sonoras.

O programa SoundPLAN® limita a escala de cores a dezesseis intervalos. Para a composição da Figura 5.6 e das seguintes escolheram-se intervalos variando de três em três decibels.

Na Figura 5.7 tem-se o resultado da simulação também sem barreira acústica, porém com os valores em dB(A).

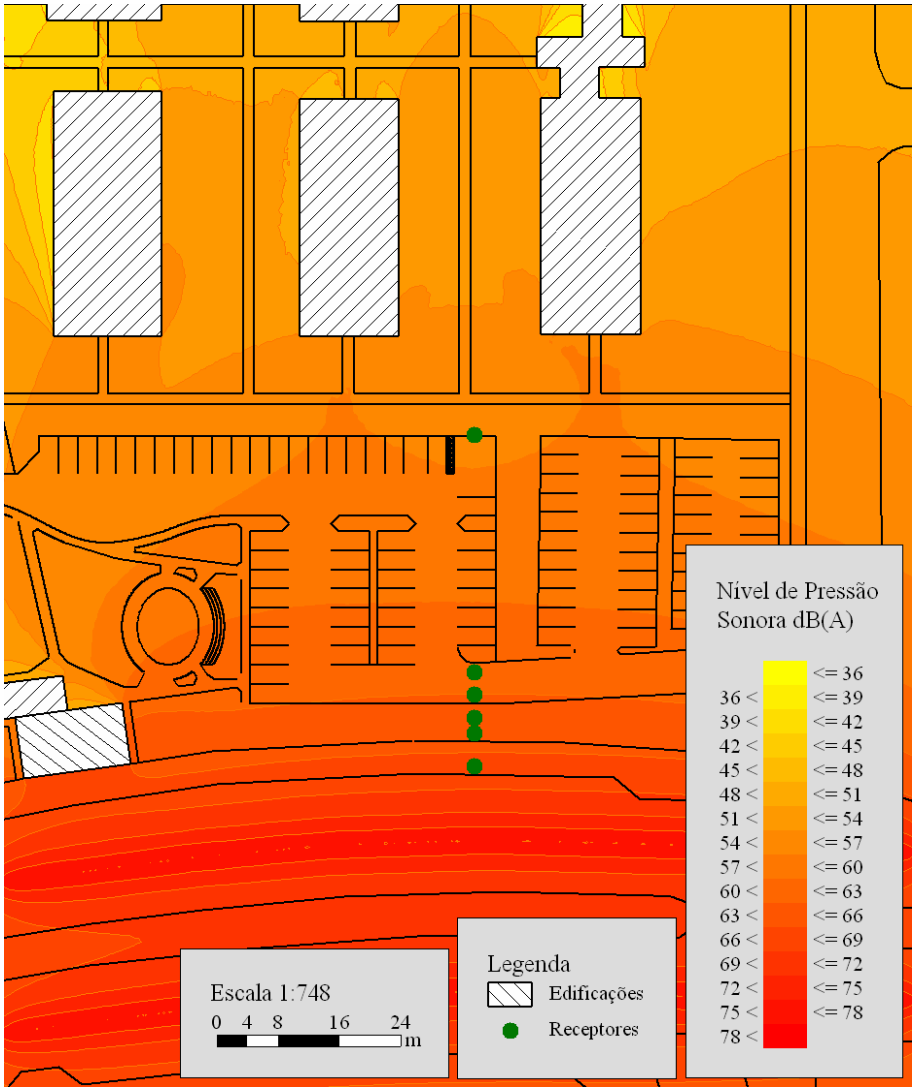


Figura 5.7 – Resultado da simulação sem barreira acústica: valores em dB(A)

No ponto P6, próximo às edificações as quais são destinadas ao processo ensino-aprendizagem, verificam-se níveis sonoros próximos de 60dB(A) que é o limite estabelecido pela legislação municipal para área central. Caso considere-se esta área como escolar, o que caberia já que se trata de uma universidade, então os níveis permissíveis estão sendo ultrapassados segundo o que recomenda a NBR 10151. No período diurno, em uma área escolar, não se deve ultrapassar os 50dB(A).

A Figura 5.8 mostra, durante o processo da simulação com barreira simples, o surgimento da sombra acústica na face da barreira oposta à geração do ruído. O mesmo ocorre na edificação próxima à via de tráfego.

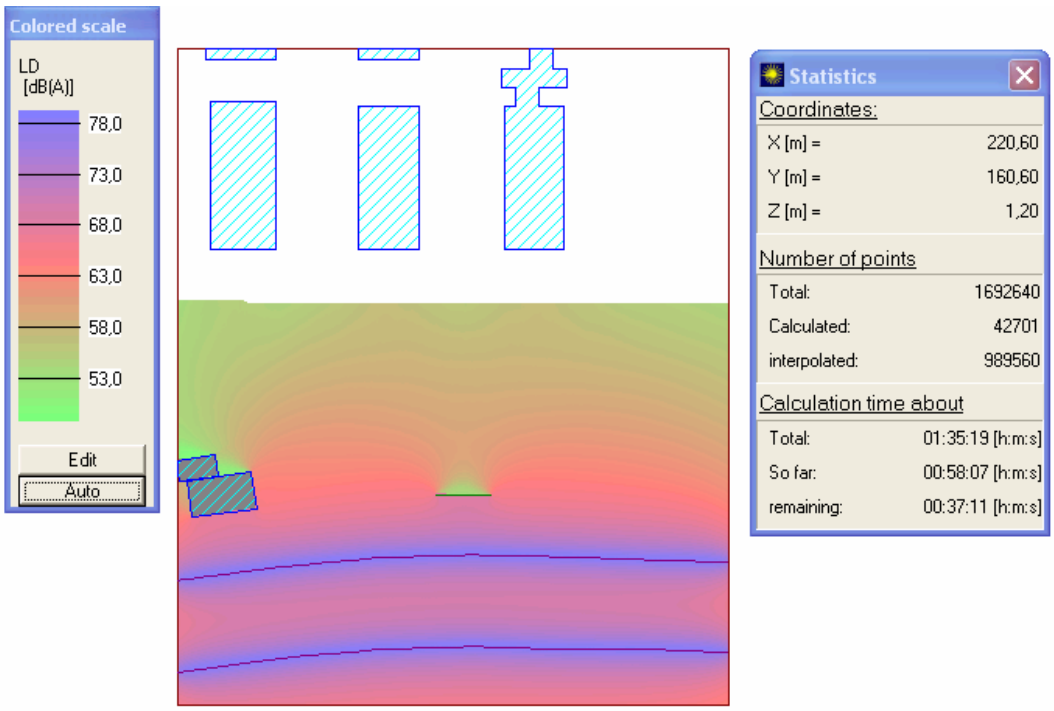


Figura 5.8 – Processo de simulação com barreira acústica simples

A Figura 5.9 traz o resultado da simulação efetuada com barreira acústica simples.

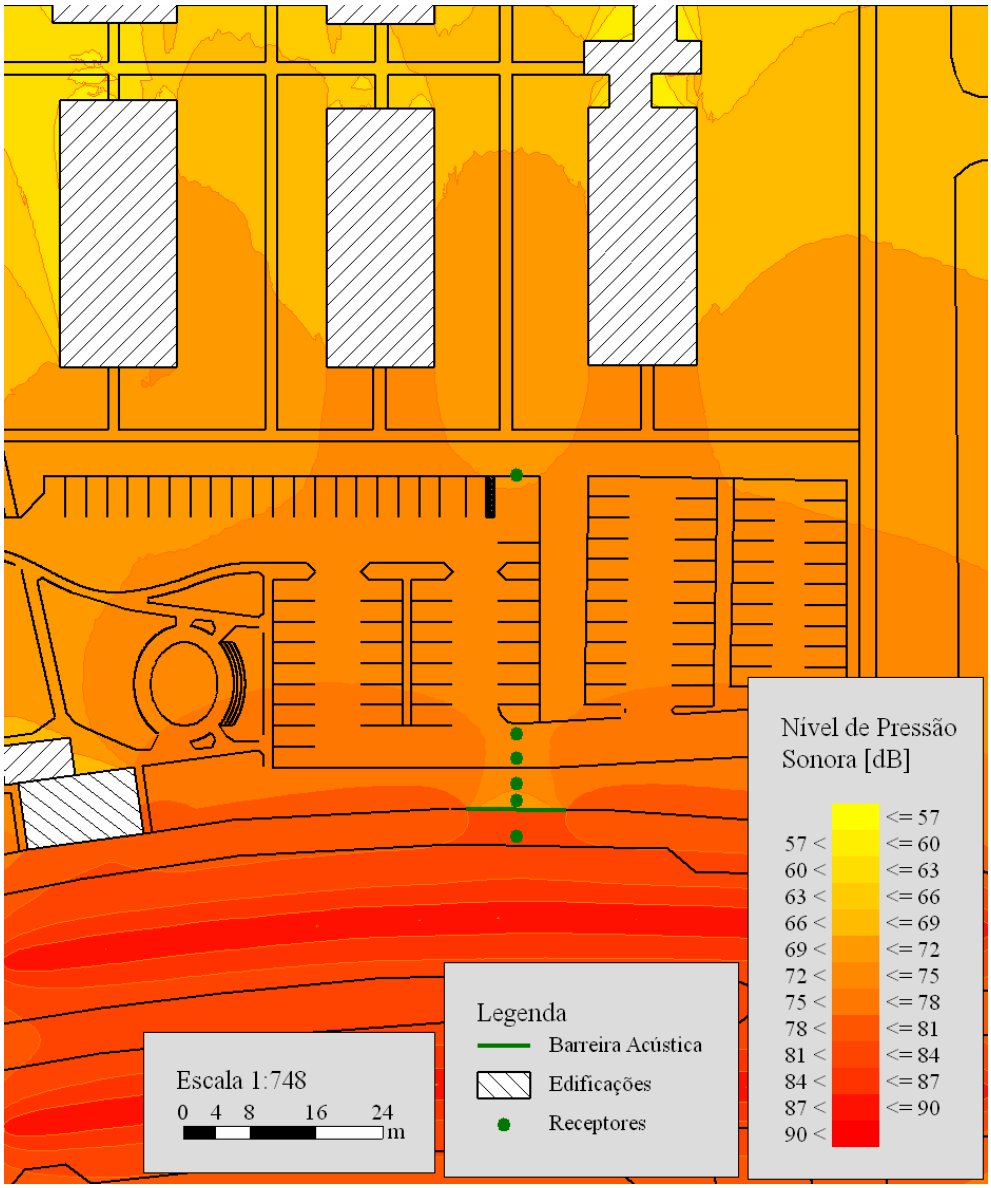


Figura 5.9 – Resultado da simulação com barreira acústica simples

Na Figura 5.9 fica claro o efeito atenuador da barreira acústica. O sombreamento acústico permite reduções dos níveis sonoros a distâncias significativas da barreira, mesmo sendo esta de pequena extensão em relação à área analisada.

A Figura 5.10 traz o resultado da simulação efetuada com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora, ou seja para a via de tráfego.

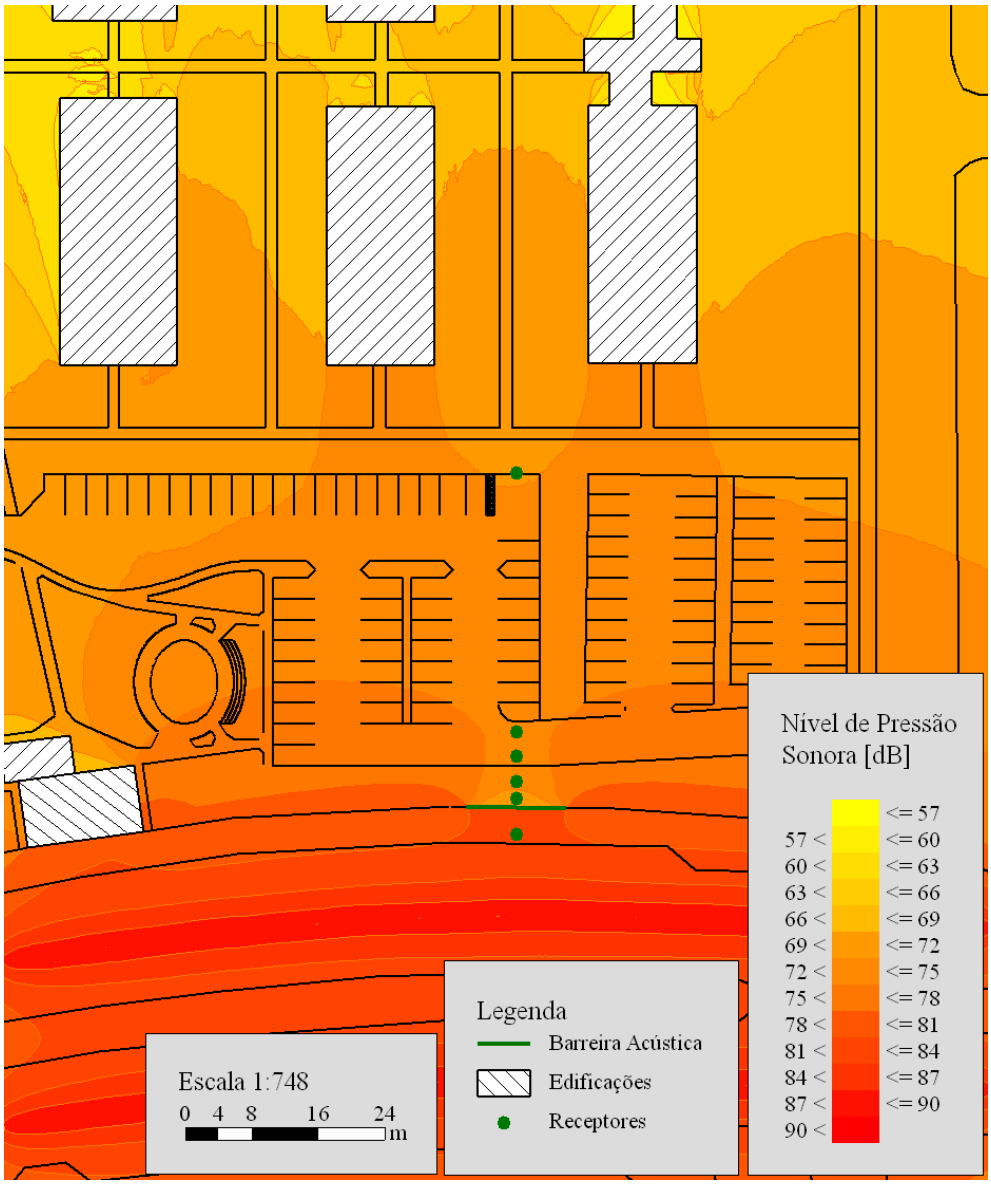


Figura 5.10 – Resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora

O resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora é muito próximo ao resultado da simulação com barreira acústica simples. Faz-se necessária uma análise mais detalhada para observar se houve alguma variação dos NPS no entorno da barreira acústica.

A Figura 5.11 traz o resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores.

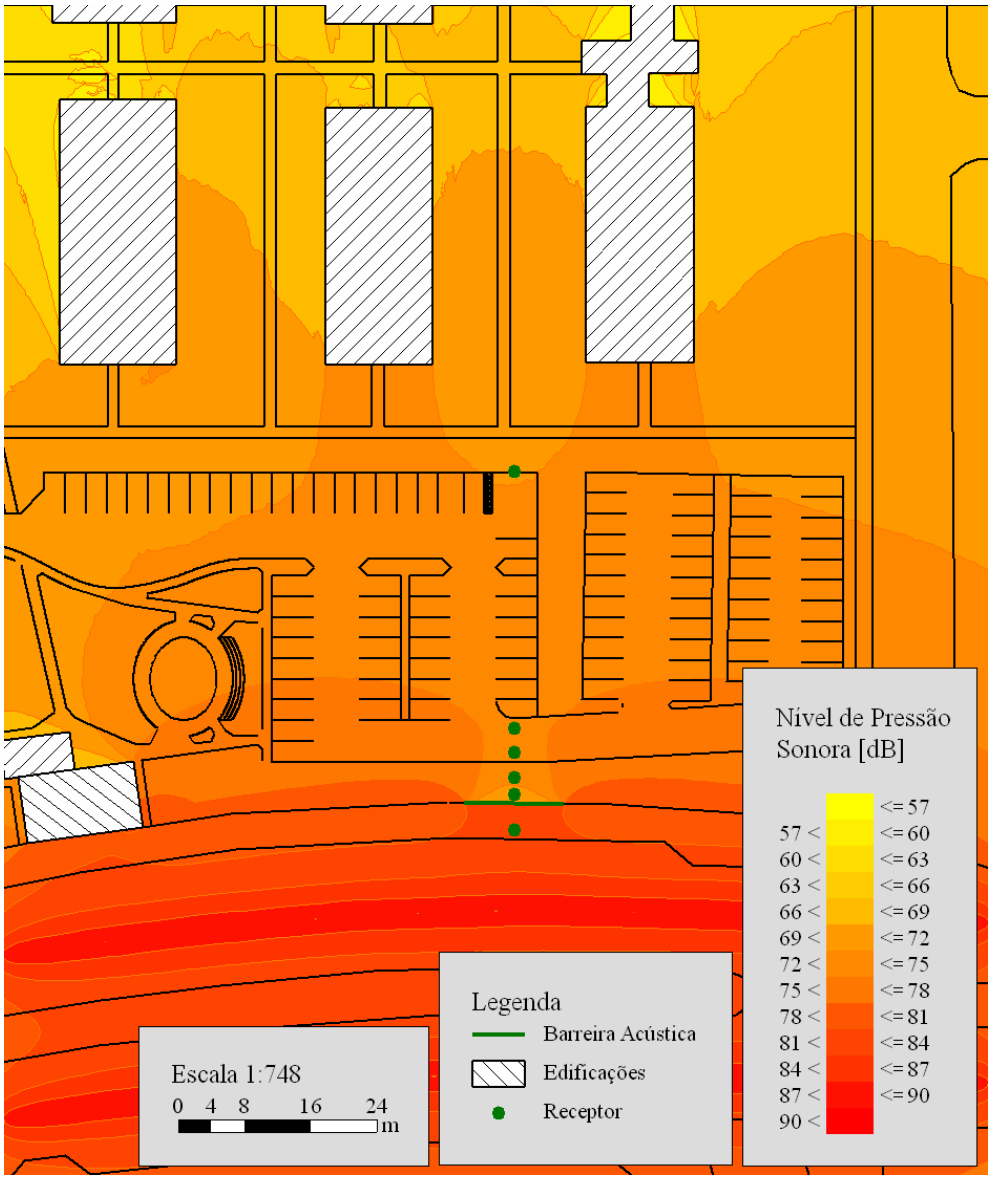


Figura 5.11 – Resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores

Verifica-se que, como na Figura 5.10, na Figura 5.11 ocorrem poucas alterações em relação à barreira simples. É possível observar apenas pequenas mudanças na inclinação das curvas que dividem as faixas de NPS.

Na Tabela 5.15 apresentam-se os valores de NPS medidos em cada receptor por ocasião de cada simulação. As unidades utilizadas são dB e dB(A).

Tabela 5.15 – Valores de NPS para cada receptor

Simulação \ Receptor	Níveis sonoros totais [dB(A)]					
	Calçada	**1m**	**3m**	**6m**	**9m**	**40m**
Sem barreira	67,0	64,9	64,1	63,1	62,2	56,3
Com barreira simples	68,5	53,8	56,6	58,9	59,4	55,6
Com barreira de ressoadores voltados para a fonte	68,3	53,8	56,6	58,9	59,4	55,6
Com barreira de ressoadores voltados para o terreno	68,5	53,7	56,5	58,9	59,4	55,6

Simulação \ Receptor	Níveis sonoros totais [dB]					
	Calçada	**1m**	**3m**	**6m**	**9m**	**40m**
Sem barreira	80,4	78,8	78,2	77,4	76,7	72,4
Com barreira simples	82,0	71,0	72,8	74,4	74,7	71,8
Com barreira de ressoadores voltados para a fonte	82,0	71,0	72,8	74,4	74,7	71,8
Com barreira de ressoadores voltados para o terreno	82,0	71,0	72,8	74,4	74,7	71,8

Observando os dados da Tabela 5.15 confirma-se que há pouca variação nos resultados de atenuação para cada tipo de barreira, percebendo-se alguma diferença somente nos pontos mais próximos das barreiras.

A Figura 5.12 traz uma comparação entre a simulação sem barreira acústica e com barreira acústica simples.

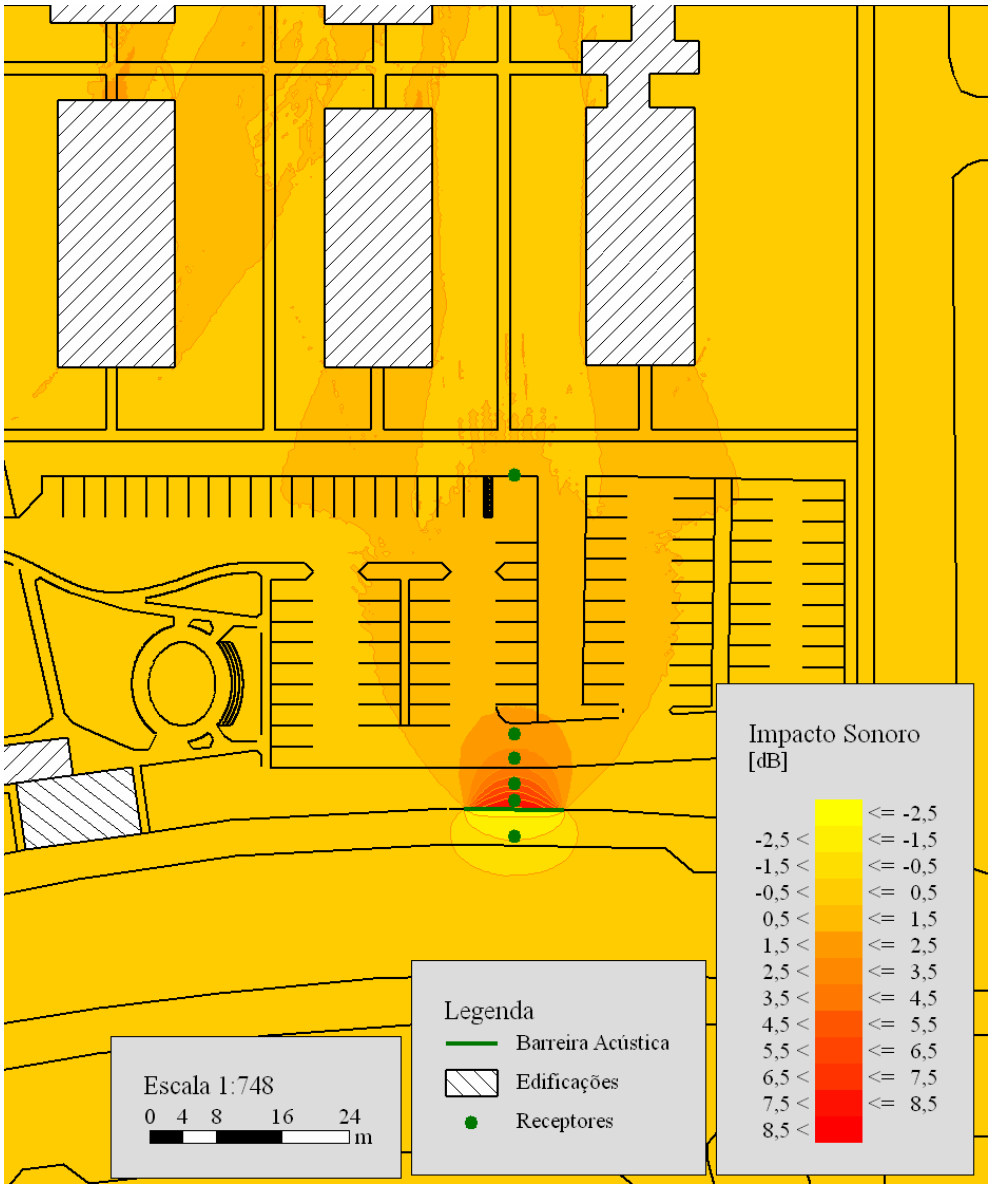


Figura 5.12 – Comparação entre as simulações sem barreira e com barreira acústica simples

Conforme esperado, o posicionamento de uma barreira acústica na trajetória das ondas sonoras permitiu que se configurasse uma região de sombra acústica e nesta, uma redução do NPS. Próximo à barreira, na face oposta à geração do ruído, obteve-se até 8,5dB de atenuação. A quarenta metros da barreira no ponto P6, apesar de pequena, também se observa uma redução do NPS, o que indica que a presença de uma barreira acústica em todo contorno do terreno poderia trazer níveis sonoros mais adequados ao local.

A Figura 5.13 traz uma comparação entre a simulação sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora.

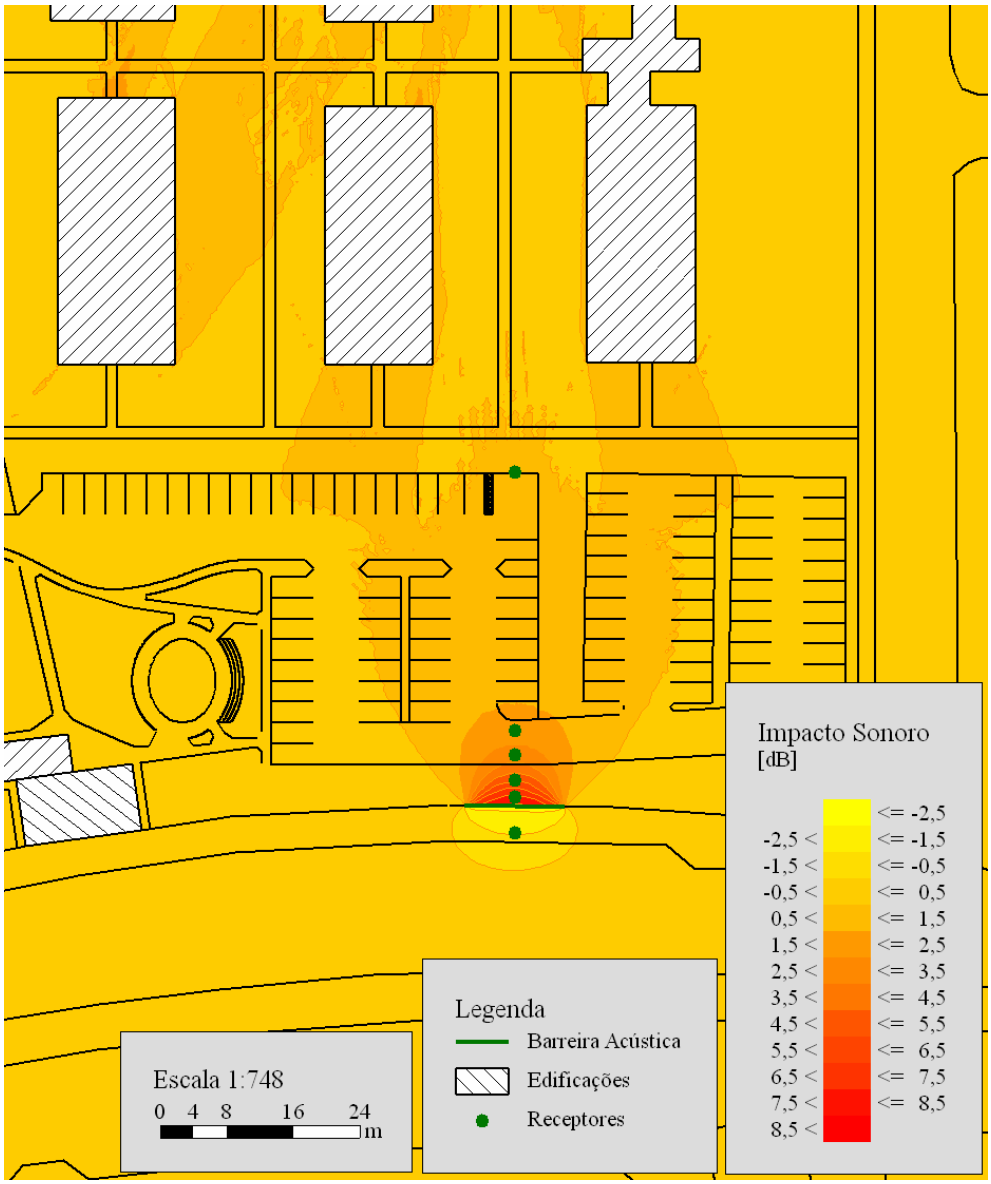


Figura 5.13 – Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora

Como era de se esperar, já que os valores de atenuação proporcionados pela barreira simples e de ressoadores são próximos, esta figura apresenta valores praticamente iguais aos da figura anterior.

A Figura 5.14 traz uma comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores.

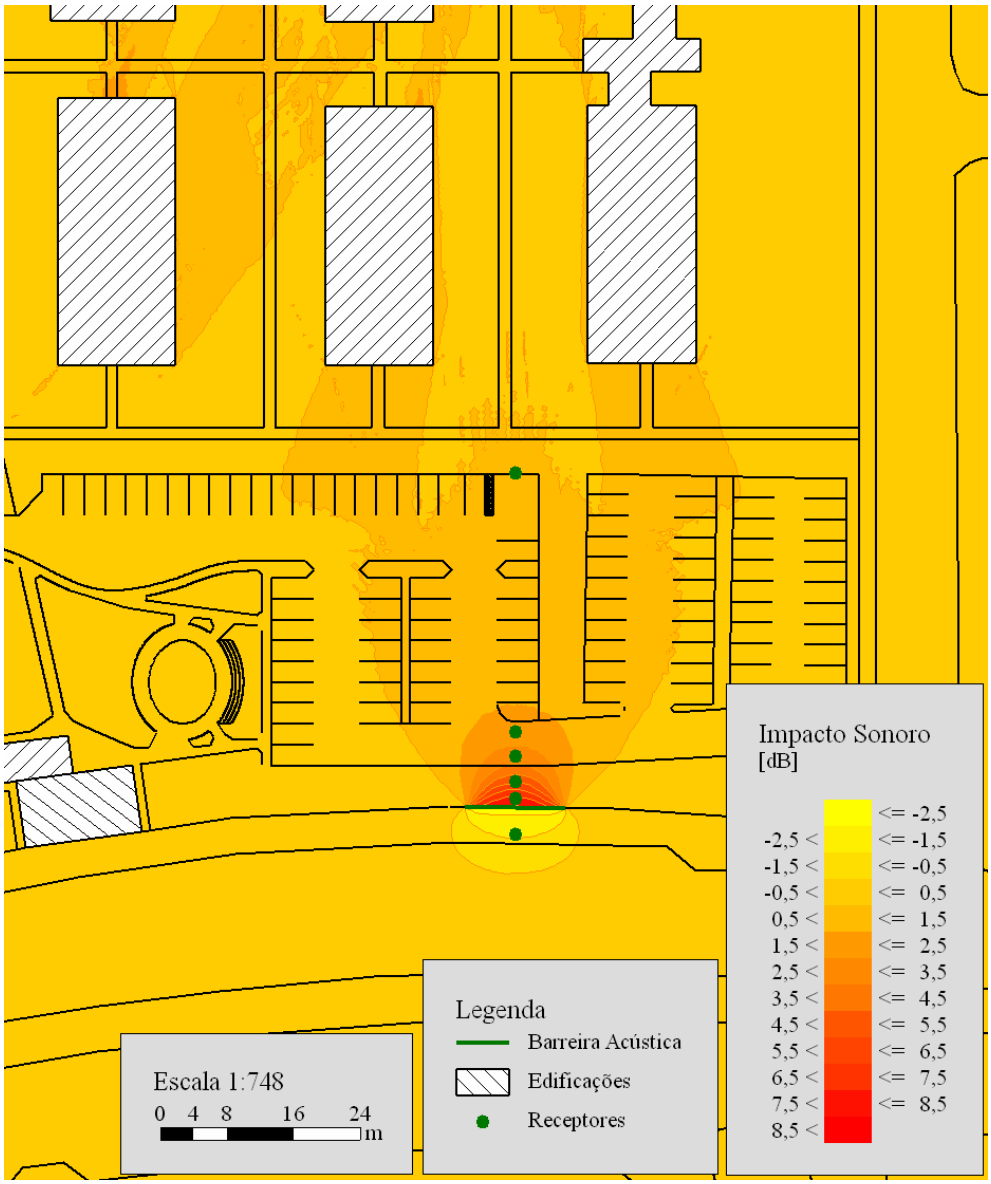


Figura 5.14 – Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores

Na Figura 5.14 novamente repetem-se os resultados apresentados nas Figuras 5.12 e 5.13.

A Figura 5.15 traz uma comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora.

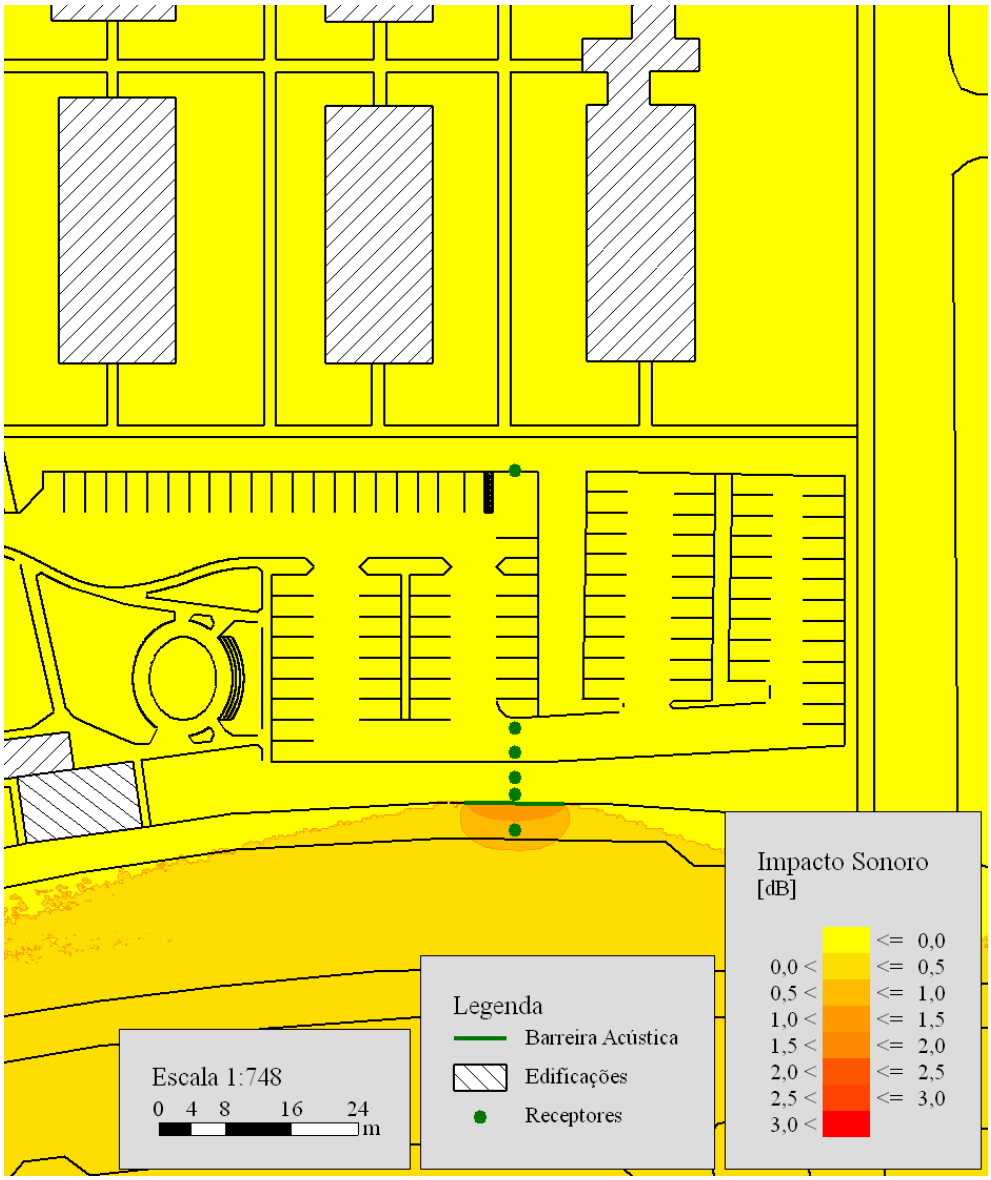


Figura 5.15 – Comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora

Ao comparar a atenuação proporcionada pelos dois tipos de barreiras, verifica-se que a barreira de ressoadores de Helmholtz permite uma redução do ruído na face voltada à geração do mesmo, que também é a face para a qual as aberturas dos ressoadores foram voltadas. Isso ocorre devido à maior absorção da barreira nesta face diminuindo a quantidade de reflexões e, conseqüentemente, o NPS.

A Figura 5.16 traz uma comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores.

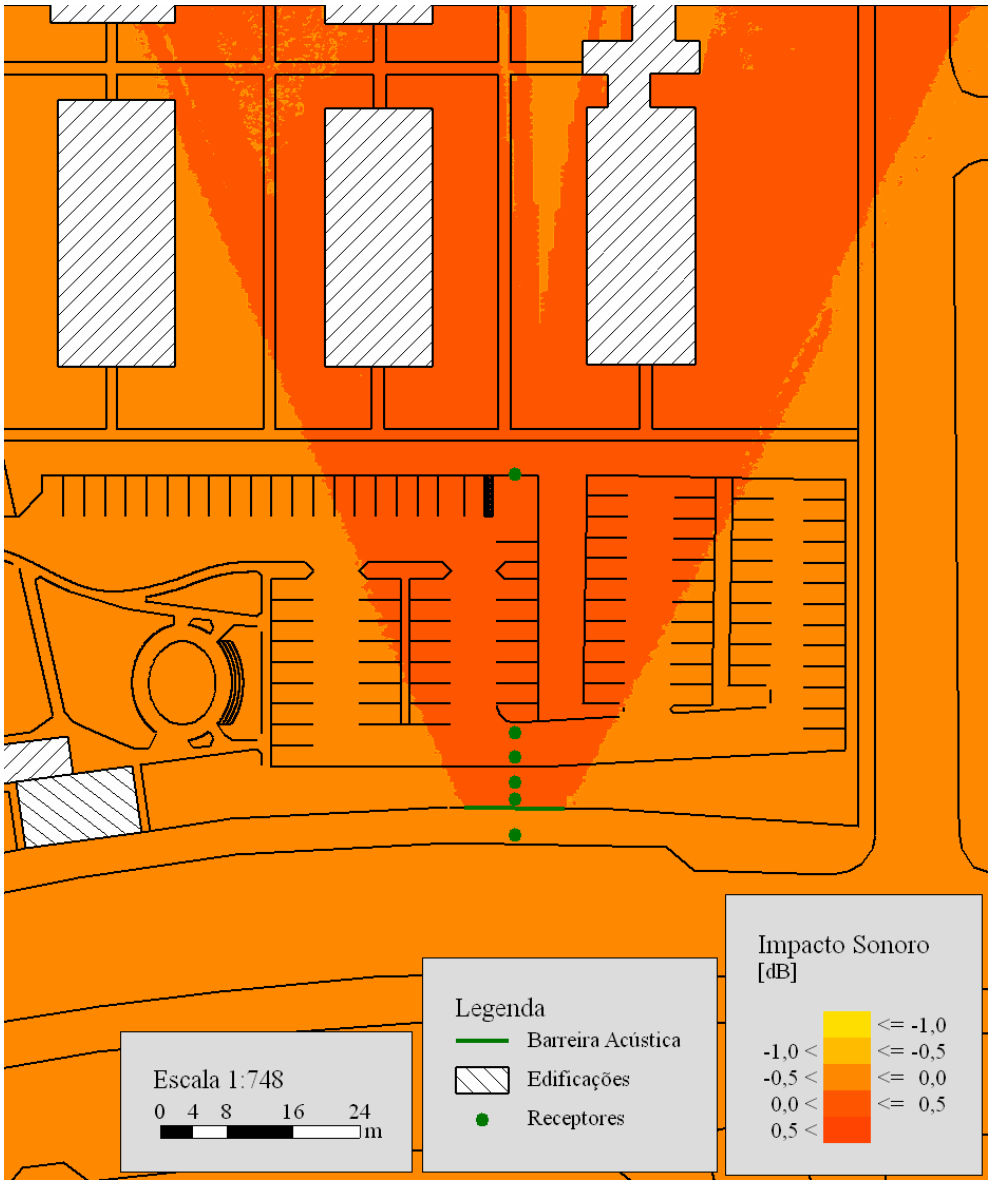


Figura 5.16 – Comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores

Analisando a Figura 5.16 observa-se que a diferença de atenuação entre barreira simples e barreira com ressoadores mudou para a face da barreira oposta à geração do ruído. Neste caso os ressoadores foram posicionados na referida face da barreira. Isto indica que é provável que a forma mais coerente de aplicação dos ressoadores seja voltados para o local onde se necessita de atenuação.

Durante as simulações até o momento apresentadas desprezou-se a absorção proporcionada pelo solo. Fez-se isso já que esta não varia e os valores comparativos permitem interpretar o fenômeno.

As Tabelas 5.16 e 5.17 trazem os gráficos resultantes das simulações realizadas próximo à Avenida Colombo.

Tabela 5.16 – Resultado das simulações realizadas próximo à Avenida Colombo – Parte 1

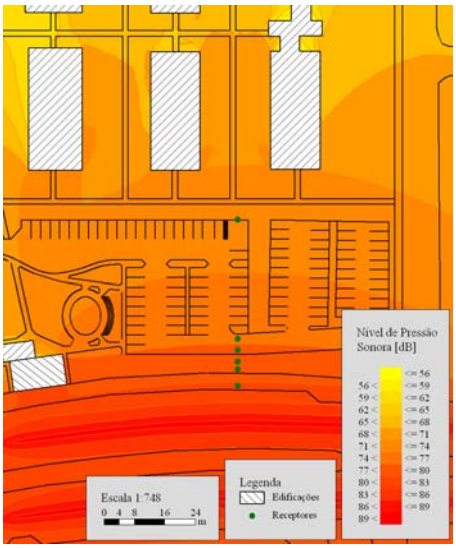
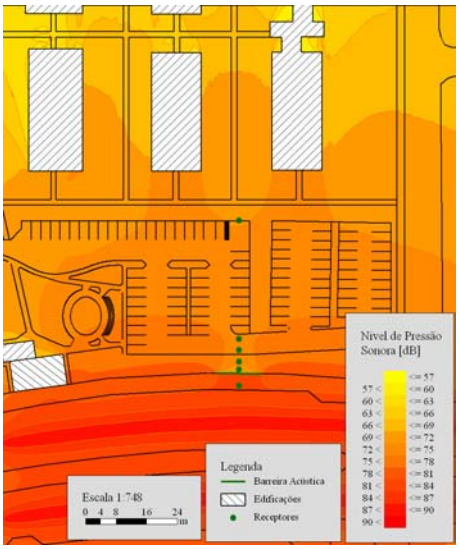
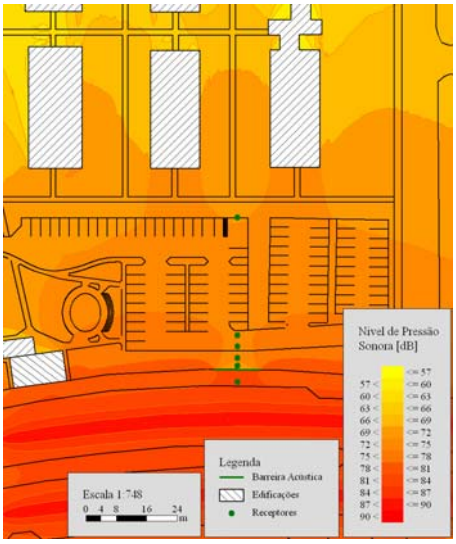
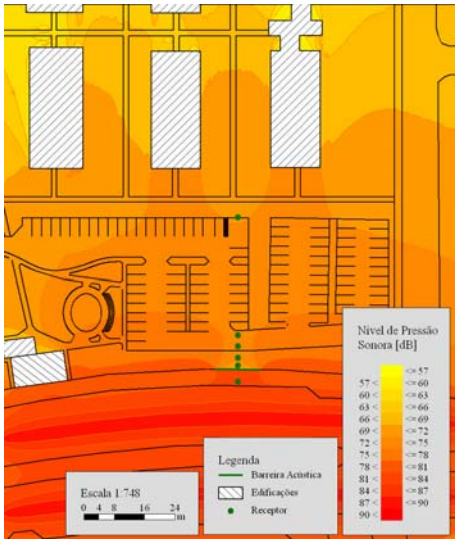
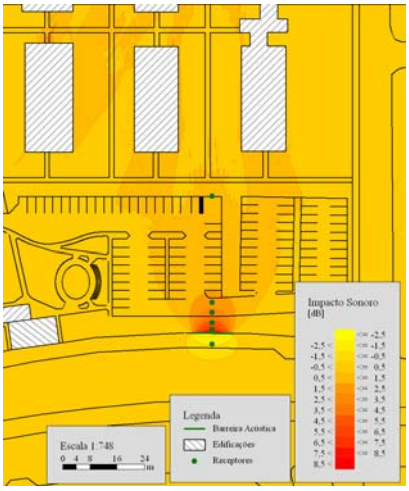
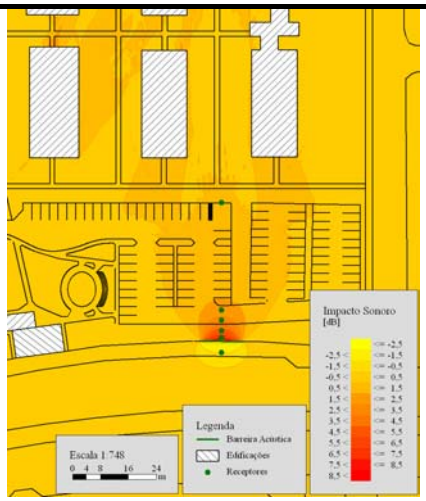
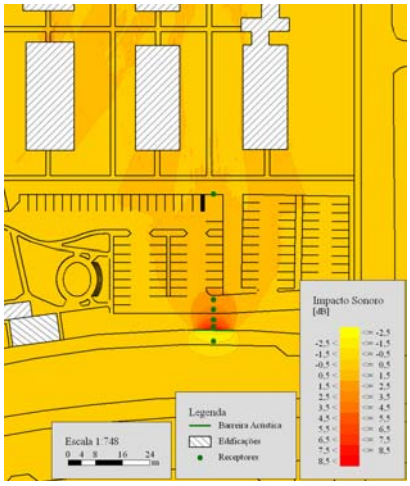
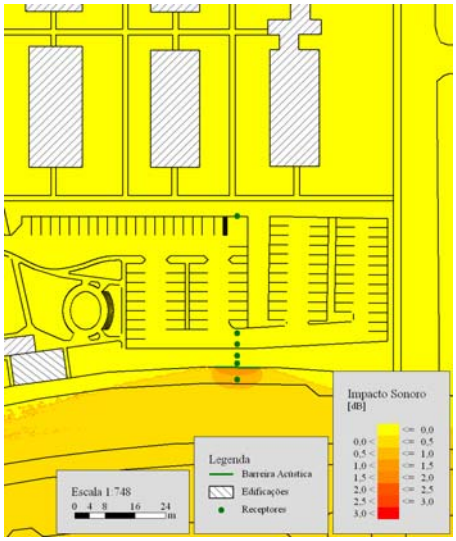
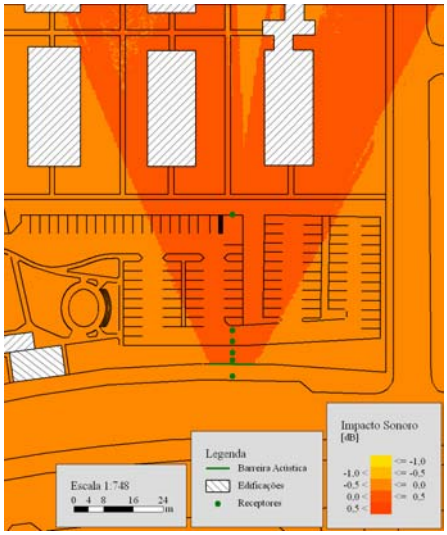
Simulação sem barreira acústica	Simulação com barreira acústica simples
	
Simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora	**Simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores**
	

Tabela 5.17 – Resultado das simulações realizadas próximo à Avenida Colombo – Parte 2

Comparação entre as simulações sem barreira e com barreira acústica simples	Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora	Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores
		

Comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora	Comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores
	

Resultados das simulações realizadas na área destinada à construção das barreiras acústicas em escala

Apresentam-se a seguir os resultados das simulações realizadas na região onde foram construídas as barreiras acústicas em escala. Conforme já mencionado, as barreiras utilizadas na simulação foram inseridas em tamanho real e não em escala, para não ocasionar acúmulo de erros. Na Tabela 5.18 estão as dimensões das barreiras em tamanho real e as dimensões dos modelos.

Tabela 5.18 – Dimensões das barreiras

	Altura [m]	Comprimento [m]
Barreira Simples		
Modelo	1,21	2,36
Protótipo	6,05	11,8
Barreira de ressoadores de Helmholtz		
Modelo	1,19	2,38
Protótipo	5,95	11,9

A Figura 5.17 traz o resultado da simulação efetuada sem barreira acústica.

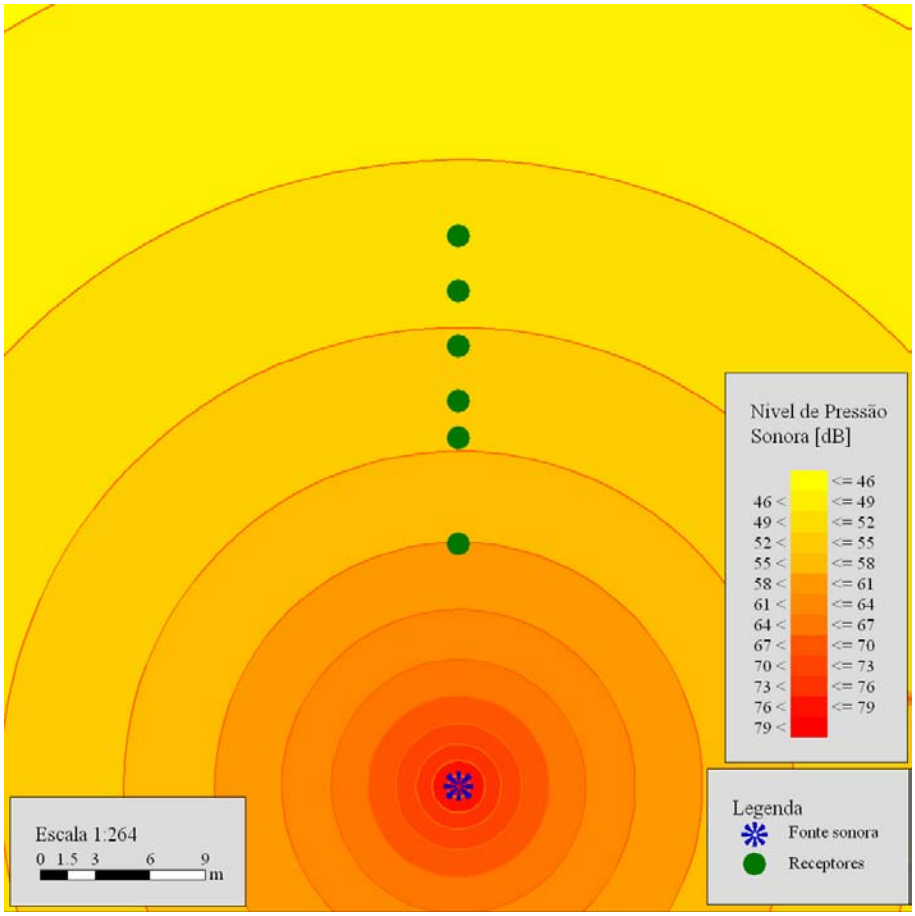


Figura 5.17 – Resultado da simulação sem barreira acústica

Como se pode observar na Figura 5.17, devido ao emprego de fonte sonora pontual a propagação sonora dá-se de forma radial. Desta mesma forma verifica-se a atenuação sonora conforme ocorre o afastamento da fonte sonora. Os valores desta simulação aproximam-se dos valores monitorados nesta área de estudo (Apêndice B).

A Figura 5.18 traz o resultado da simulação efetuada com barreira acústica simples.

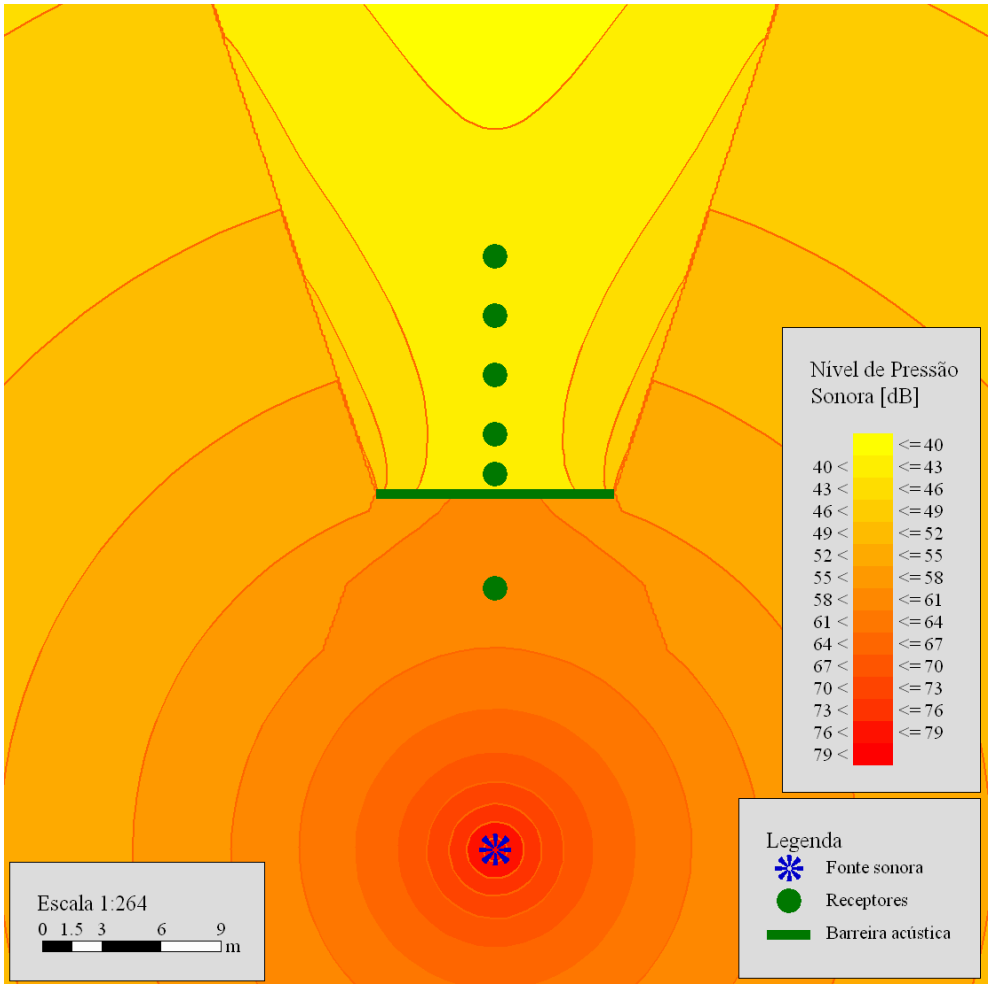


Figura 5.18 – Resultado da simulação com barreira acústica simples

Na Figura 5.18, assim como na Figura 5.9, fica bastante claro o efeito atenuador da barreira acústica. Na face da barreira voltada para a fonte sonora, observa-se um aumento do NPS, o que se deve às reflexões das ondas sonoras incidentes na barreira.

A Figura 5.19 traz o resultado da simulação efetuada com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora.

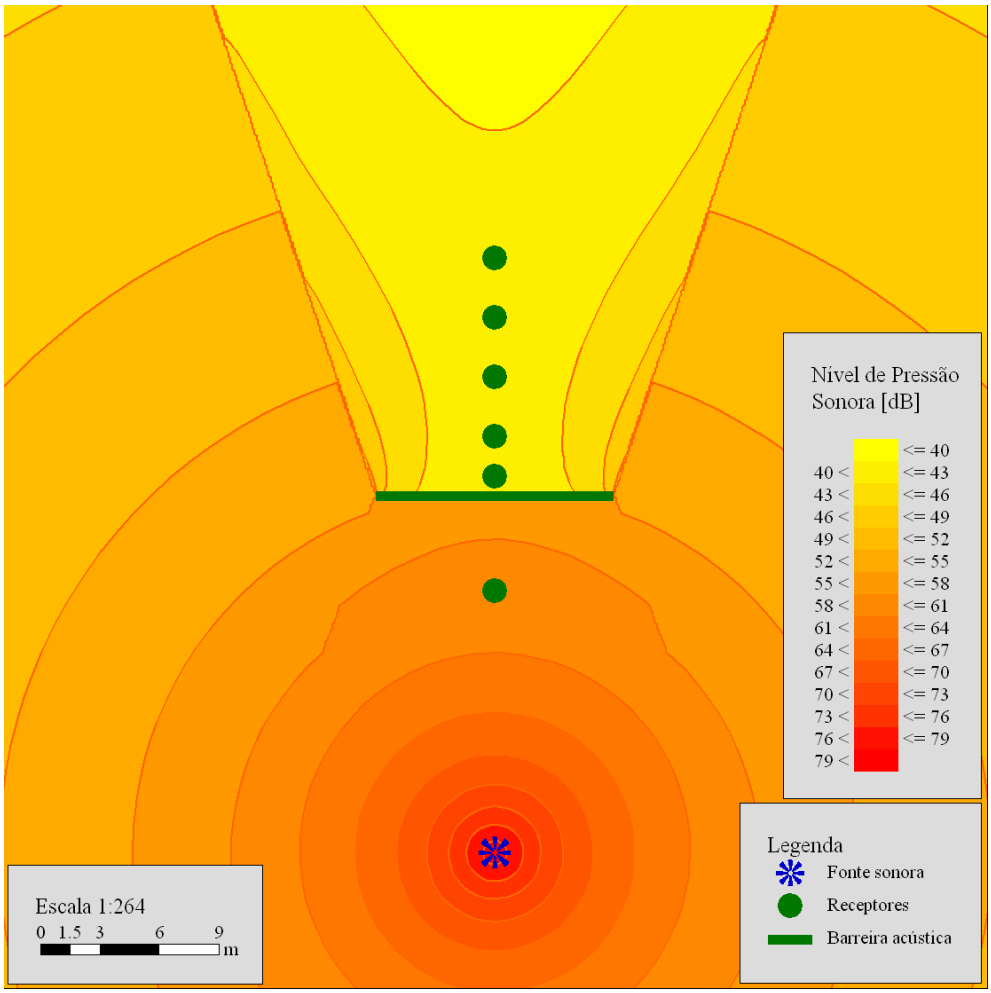


Figura 5.19 – Resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora

Nesta simulação é nítida a redução do NPS na face da barreira voltada para a fonte sonora, ou seja, na face onde estão as aberturas dos ressoadores. Isso ocorre devido à absorção proporcionada por eles. Os demais valores mantêm-se praticamente iguais aos valores da simulação com barreira acústica simples (Figura 5.18).

A Figura 5.20 traz o resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores.

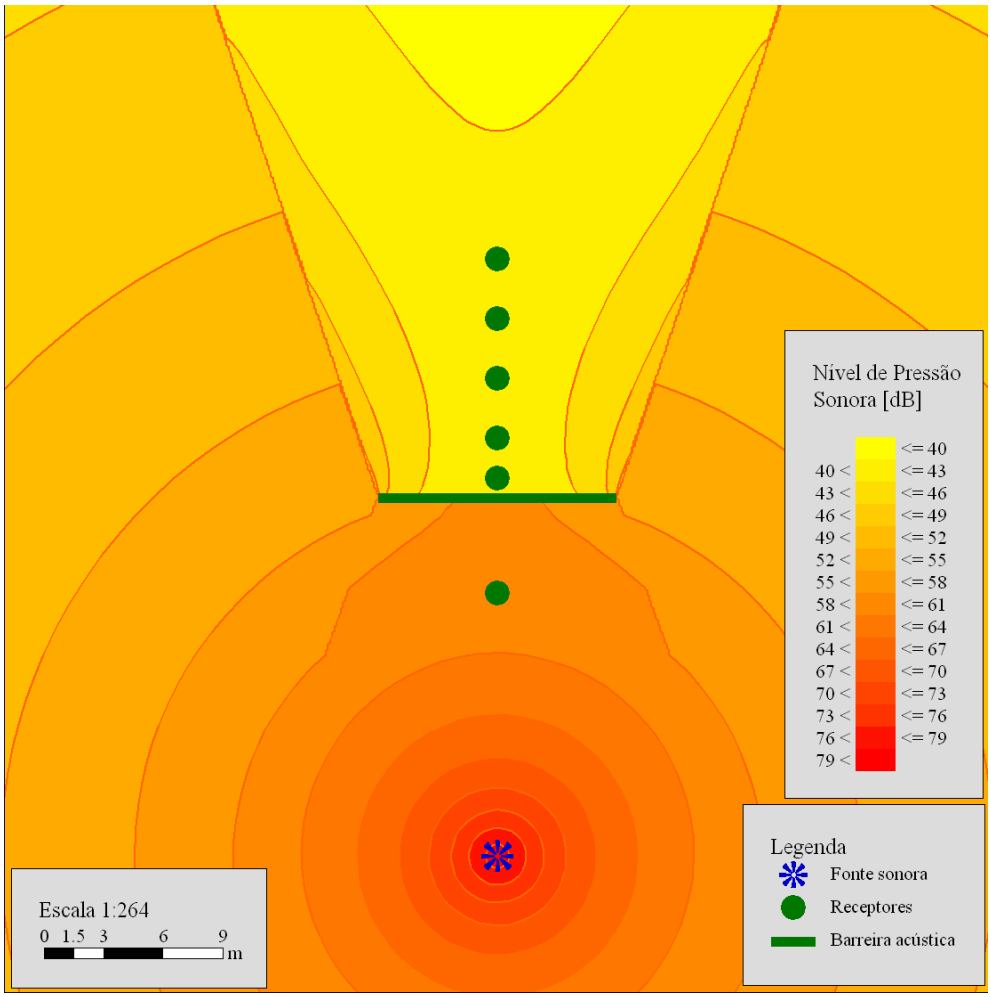


Figura 5.20 – Resultado da simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores

Verifica-se que, como na Figura 5.11, na Figura 5.20 pouco é alterado em relação à barreira simples. Repetem-se apenas pequenas mudanças na inclinação das curvas que dividem as faixas de NPS.

Na Tabela 5.19 apresentam-se os valores de NPS medidos em cada receptor por ocasião das simulações com fonte pontual. Onde se lê "calçada", entenda-se que é o ponto onde estaria locado um receptor a um metro do meio fio, na calçada, se esta fosse a simulação na área próxima à Avenida Colombo.

Tabela 5.19 – Valores de NPS para cada receptor

Simulação \ Receptor	Níveis sonoros totais [dB(A)]					
	calçada	**1m**	**3m**	**6m**	**9m**	**12m**
Sem barreira	55,5	52	51	49,7	48,5	47,5
Com barreira simples	56,5	34	33,4	32,6	31,9	31,2
Com barreira de ressoadores voltados para a fonte	56,3	34	33,4	32,6	31,9	31,2
Com barreira de ressoadores voltados para o terreno	56,5	34	33,4	32,6	31,9	31,2

Simulação \ Receptor	Níveis sonoros totais [dB]					
	calçada	**1m**	**3m**	**6m**	**9m**	**12m**
Sem barreira	58,1	54,6	53,7	52,4	51,3	50,2
Com barreira simples	59,2	41,9	42,0	41,8	41,5	41,1
Com barreira de ressoadores voltados para a fonte	59,0	41,9	42,0	41,8	41,5	41,1
Com barreira de ressoadores voltados para o terreno	59,2	41,9	42,0	41,8	41,5	41,1

Observa-se na Tabela 5.19 que mesmo com diferenças claras nas imagens das simulações, os NPS em cada ponto não sofreram alterações.

A Figura 5.21 traz uma comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica simples.

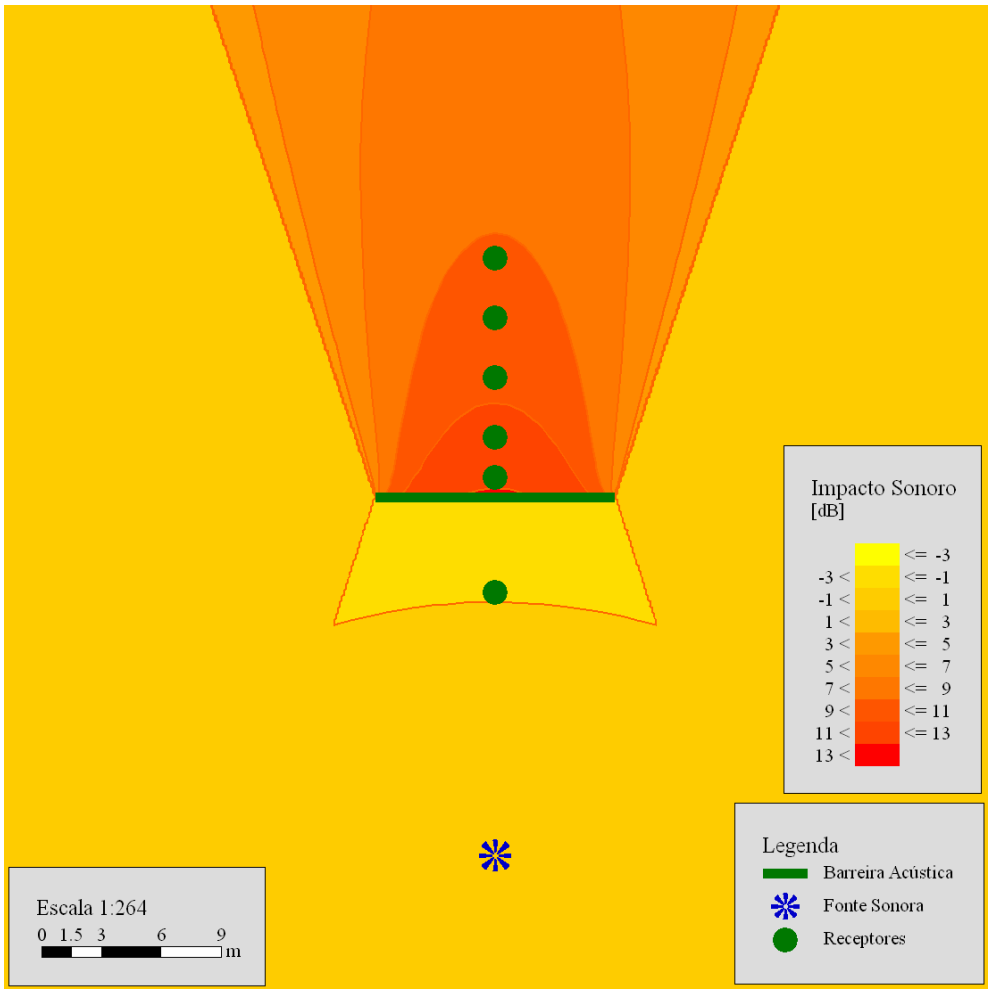


Figura 5.21 – Comparação entre as simulações sem barreira e com barreira acústica simples

Com a Figura 5.21 confirma-se que o posicionamento de uma barreira acústica na trajetória das ondas sonoras permite a configuração de uma região de sombra acústica. Neste caso, obteve-se uma redução do ruído de até 13dB. Na prática a atenuação verificada foi ainda maior como consta na Tabela 5.10.

A Figura 5.22 traz uma comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora.

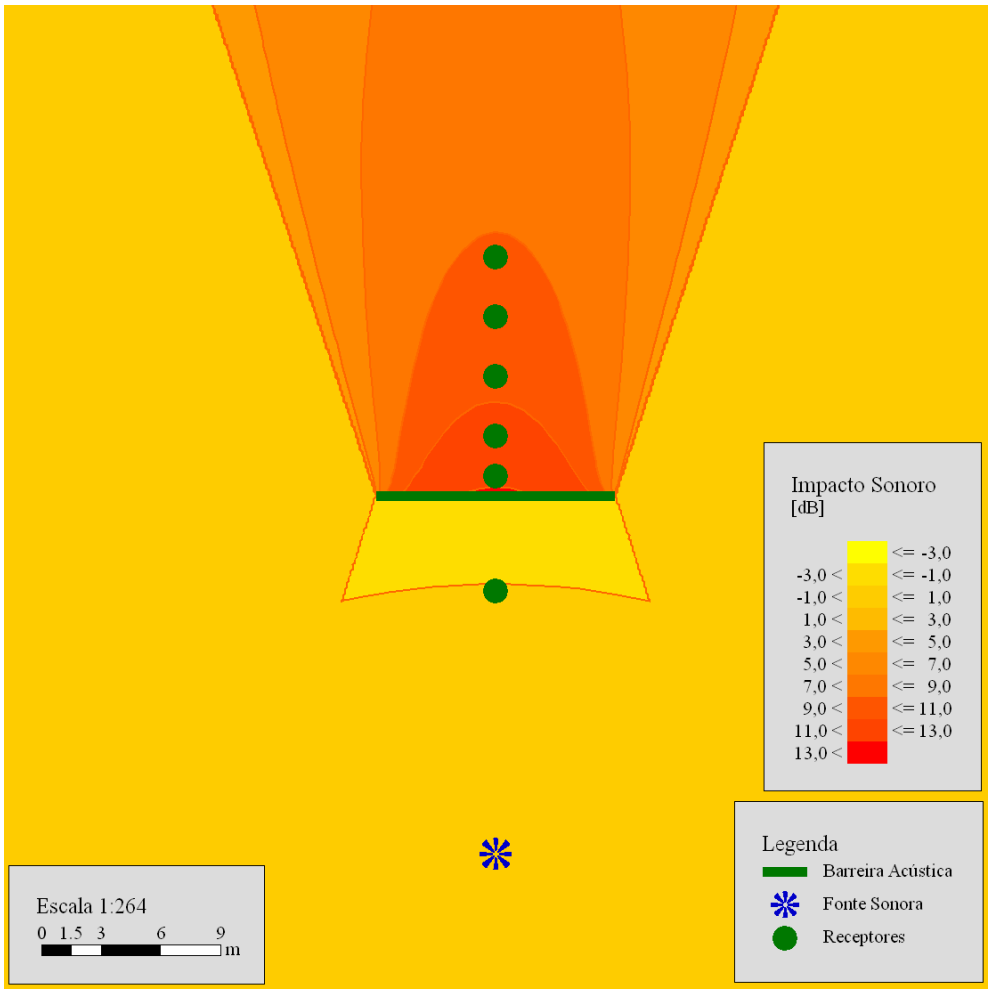


Figura 5.22 – Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora

Os valores de atenuação proporcionados pela barreira simples e pela barreira de ressoadores voltados para a fonte são bastante próximos. Verifica-se na Figura 5.22 uma pequena diminuição das reflexões causadas pela barreira, o que se deve à presença dos ressoadores na face da barreira voltada para a fonte sonora.

A Figura 5.23 traz uma comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores.

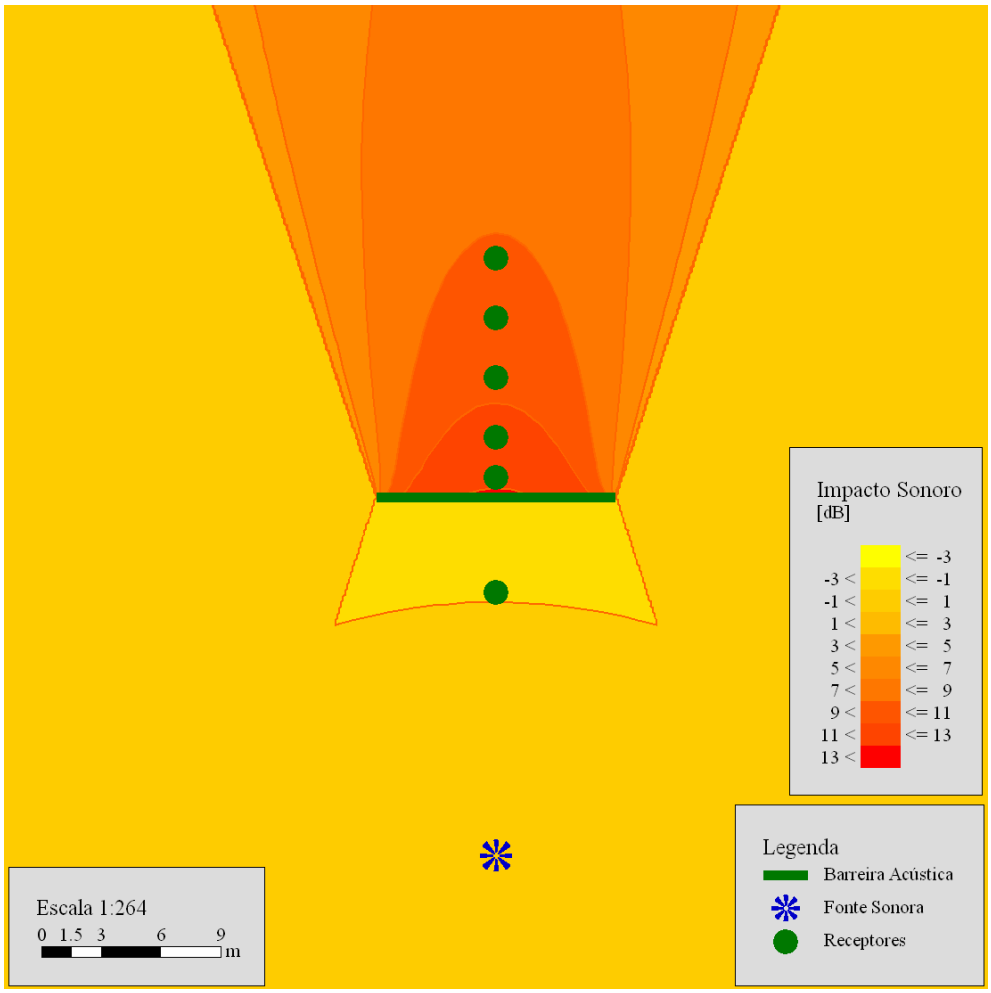


Figura 5.23 – Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores

Na Figura 5.23, observa-se o aumento das reflexões na face da barreira voltada para a fonte, já que nesta simulação os ressoadores estão voltados para a outra face. Não se percebem alterações de NPS na face da barreira oposta à geração do ruído.

A Figura 5.24 traz uma comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora.

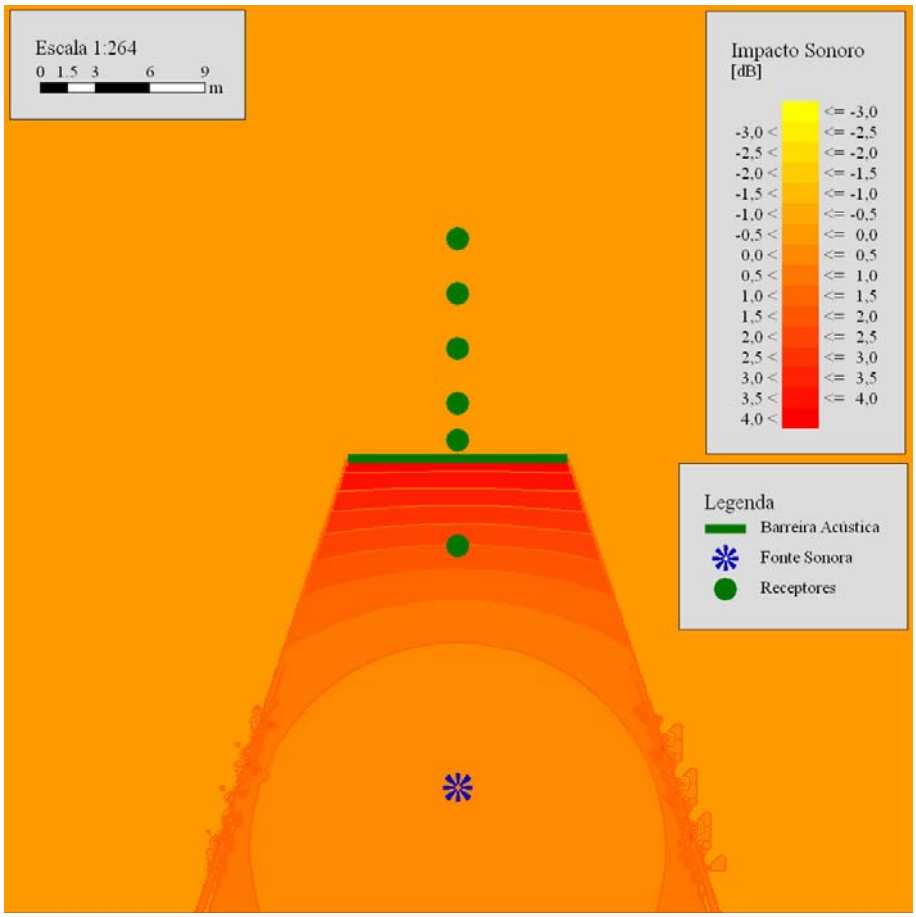


Figura 5.24 – Comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora

Conforme se verificou anteriormente na Figura 5.15, na Figura 5.24 ao comparar a atenuação proporcionada pelos dois tipos de barreiras, observa-se que a barreira com ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora permite uma redução do ruído na face voltada à geração do mesmo. Neste caso obtiveram-se até 4dB de atenuação.

Ao fazer-se a comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores não se obteve qualquer diferença de NPS. Observa-se que as operações de comparação entre duas simulações foram efetuadas no ambiente do programa por meio de comandos de subtração de níveis sonoros.

As Tabelas 5.20 e 5.21 trazem os gráficos resultantes das simulações realizadas na área destinada à construção das barreiras acústica em escala.

Tabela 5.20 – Resultado das simulações realizadas na área destinada à construção das barreiras acústicas em escala– Parte 1

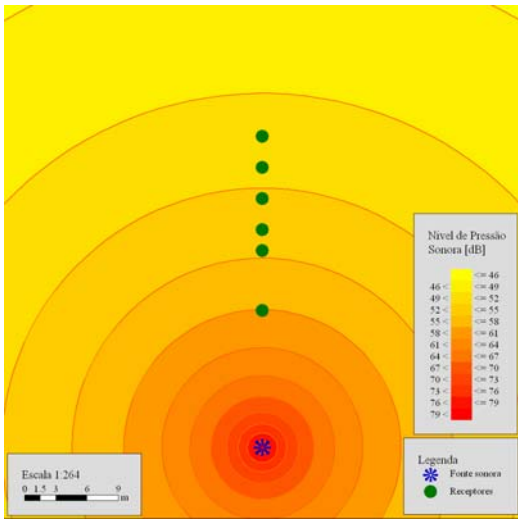
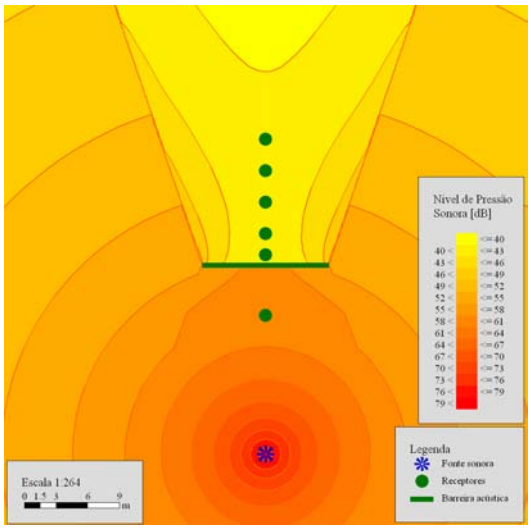
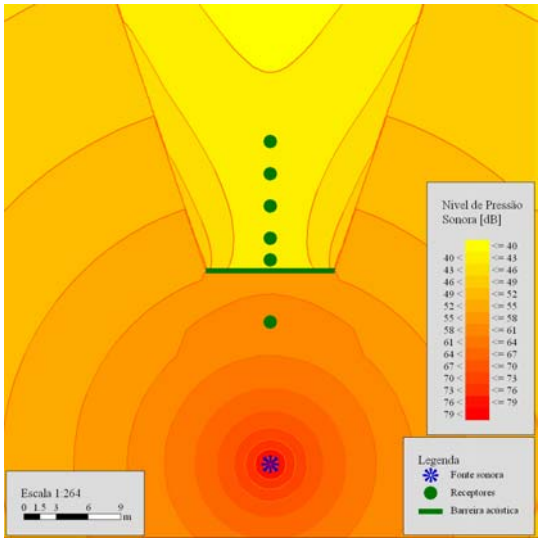
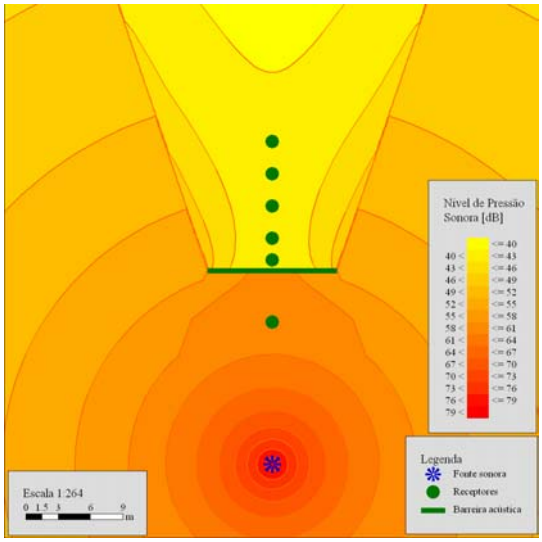
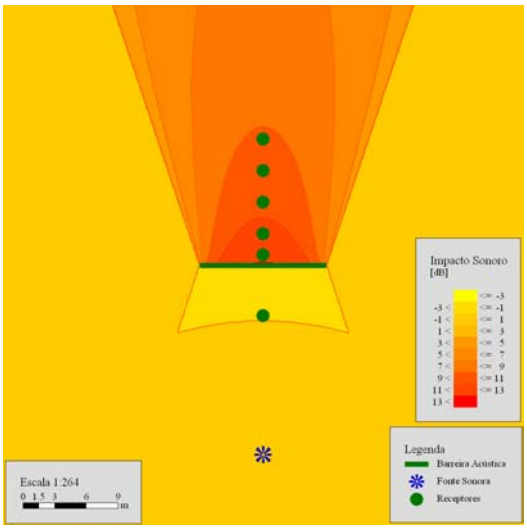
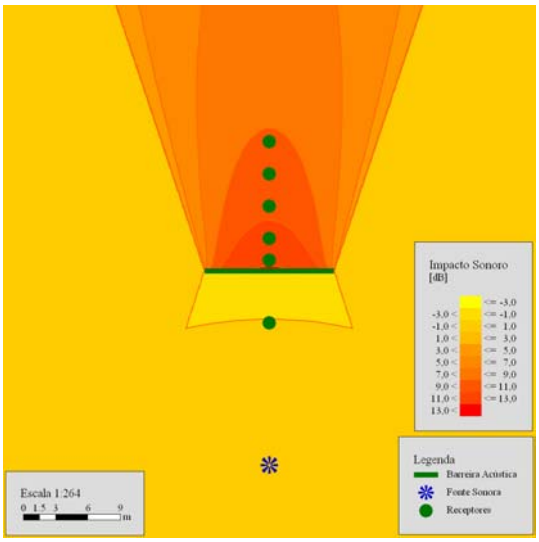
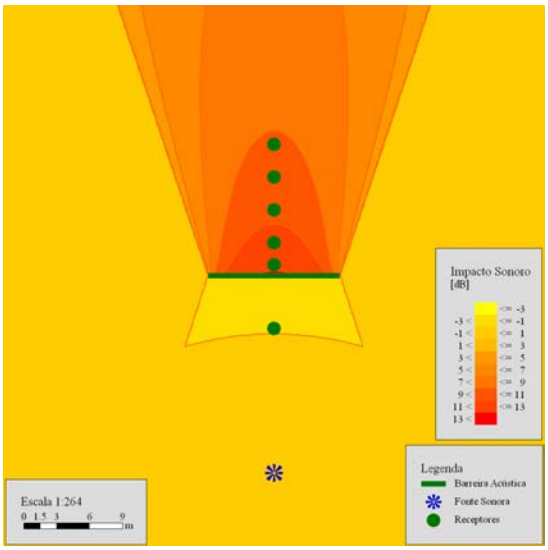
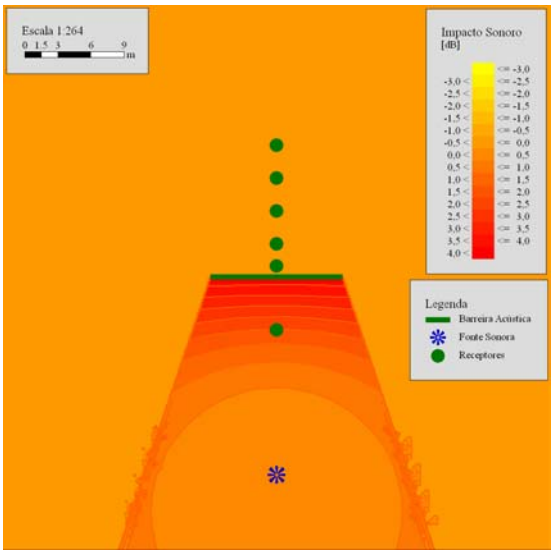
Simulação sem barreira acústica	Simulação com barreira acústica simples
	
Simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora	**Simulação com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores**
	

Tabela 5.21 – Resultado das simulações realizadas na área destinada à construção das barreiras acústicas em escala– Parte 2

Comparação entre as simulações sem barreira e com barreira acústica simples	Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora
	
Comparação entre as simulações sem barreira acústica e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores	**Comparação entre as simulações com barreira acústica simples e com barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora**
	

5.1.6 Aplicação do conceito de perda na inserção

Com base na geometria das barreiras construídas calculou-se a perda na inserção da barreira (IL). Salienta-se que neste cálculo considera-se somente a atenuação proporcionada pela difração, como se as barreiras acústicas fossem barreiras infinitas, ou

seja, não se considera a perda na atenuação causada pela difração nas laterais das barreiras acústicas. Também não é considerado no cálculo da IL o efeito dos ressoadores de Helmholtz com os quais foi construída uma das barreiras.

Para efetuar-se o cálculo da perda na inserção proporcionada pelas barreiras construídas em escala, primeiramente apresentam-se as Figuras 5.25 e 5.26 nas quais se encontram o posicionamento da fonte sonora e dos receptores, além das dimensões respectivamente das barreiras simples e barreiras com ressoadores de Helmholtz.

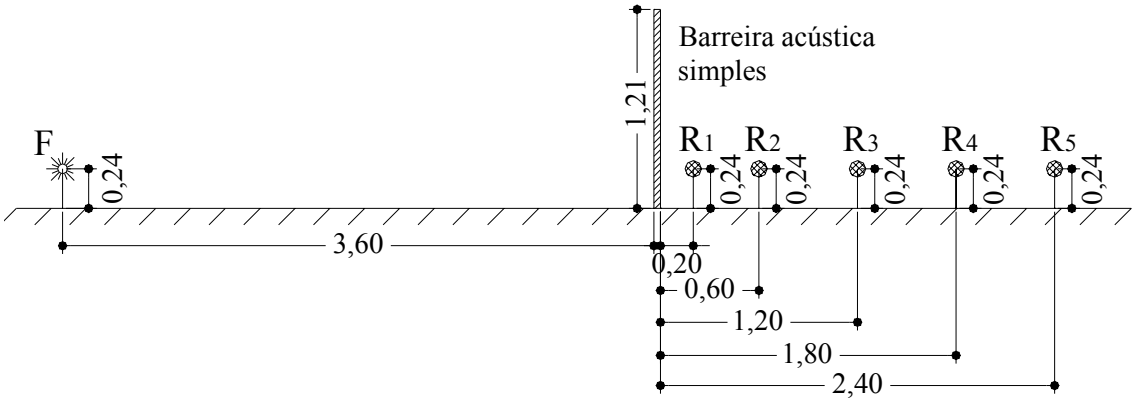


Figura 5.25 – Barreira acústica simples

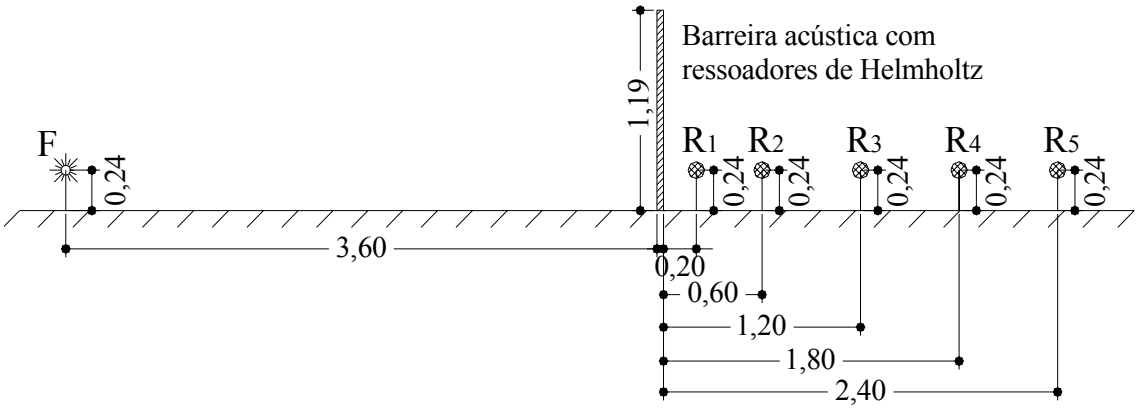


Figura 5.26 – Barreira acústica com ressoadores de Helmholtz

Considerando as distâncias "a" (distância entre a fonte e o topo da barreira), "b" (distância entre o topo da barreira e o receptor) e "d" (distância em linha reta da fonte até o receptor) conforme apresentado anteriormente na Figura 3.14, calculam-se os valores de δ para cada posição de receptor conforme a Equação 3.10. As distâncias utilizadas assim como os valores obtidos encontram-se na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Cálculo dos valores de δ para cada posição de receptor

Receptor	a [m]	b [m]	d [m]	δ
Barreira acústica simples				
R_1	3,73	0,99	3,84	0,88
R_2	3,73	1,14	4,24	0,63
R_3	3,73	1,54	4,84	0,43
R_4	3,73	2,04	5,44	0,33
R_5	3,73	2,59	6,04	0,28
Barreira acústica com ressoadores de Helmholtz				
R_1	3,72	0,97	3,84	0,85
R_2	3,72	1,12	4,24	0,61
R_3	3,72	1,53	4,84	0,41
R_4	3,72	2,04	5,44	0,32
R_5	3,72	2,58	6,04	0,26

Calcula-se então o Número de Fresnel para cada posição do receptor aplicando a Equação 3.11, considerando as freqüências em banda de oitava entre 31,5 e 8kHz. O comprimento de onda para as freqüências abordadas foi calculado considerando-se a temperatura igual a 25ºC, o que aproxima a velocidade do ar a 347m/s. Os valores calculados são apresentados nas Tabelas 5.23 e 5.24.

Tabela 5.23 – Cálculo dos valores de N para cada posição de receptor com barreira acústica simples

Freqüência [Hz]	λ [m]	Número de Fresnel - N				
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
31,5	11,00	0,16	0,11	0,08	0,06	0,05
63	5,50	0,32	0,23	0,16	0,12	0,10
125	2,77	0,63	0,45	0,31	0,24	0,20
250	1,39	1,27	0,91	0,62	0,48	0,40
500	0,69	2,54	1,81	1,24	0,96	0,80
1000	0,35	5,07	3,63	2,49	1,92	1,60
2000	0,17	10,14	7,26	4,98	3,84	3,20
4000	0,09	20,29	14,52	9,96	7,69	6,39
8000	0,04	40,57	29,04	19,92	15,38	12,79

Tabela 5.24 – Cálculo dos valores de N para cada posição de receptor com barreira acústica com ressoadores de Helmholtz

Freqüência [Hz]	λ [m]	Número de Fresnel - N				
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
31,5	11,00	0,16	0,11	0,08	0,06	0,05
63	5,50	0,31	0,22	0,15	0,12	0,10
125	2,77	0,62	0,44	0,30	0,23	0,19
250	1,39	1,23	0,88	0,60	0,46	0,38
500	0,69	2,46	1,75	1,19	0,92	0,76
1000	0,35	4,93	3,50	2,39	1,84	1,53
2000	0,17	9,86	7,00	4,77	3,68	3,05
4000	0,09	19,71	14,01	9,55	7,35	6,10
8000	0,04	39,43	28,01	19,10	14,70	12,21

De posse destes valores foi possível calcular a perda na inserção por meio da Equação 3.12. É importante lembrar que tal equação é válida para valores de N menores ou iguais a 12,5. Quando N atingiu valores maiores que 12,5 considerou-se a perda na inserção igual a 20dB. As Tabelas 5.25 e 5.26 trazem os valores calculados de perda na inserção para a barreira acústica simples e a barreira acústica com ressoadores de Helmholtz.

Tabela 5.25 – Perda na inserção para cada posição de receptor com barreira acústica simples

Freqüência [Hz]	Perda na inserção - IL [dB]				
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
31,5	7,37	6,79	6,28	6,01	5,85
63	9,05	8,16	7,34	6,88	6,60
125	11,32	10,14	8,97	8,28	7,84
250	14,07	12,71	11,26	10,34	9,73
500	17,03	15,59	14,00	12,94	12,21
1000	20,03	18,58	16,95	15,84	15,05
2000	23,04	21,59	19,95	18,83	18,03
4000	20,00	20,00	22,96	21,84	21,04
8000	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00

Tabela 5.26 – Perda na inserção para cada posição de receptor com barreira acústica com ressoadores de Helmholtz

Freqüência [Hz]	Perda na inserção - IL [dB]				
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
31,5	7,32	6,73	6,23	5,97	5,82
63	8,97	8,07	7,26	6,81	6,54
125	11,22	10,02	8,85	8,17	7,74
250	13,95	12,56	11,10	10,19	9,58
500	16,90	15,44	13,82	12,76	12,02
1000	19,91	18,43	16,77	15,64	14,85
2000	22,92	21,43	19,77	18,64	17,83
4000	20,00	20,00	22,78	21,65	20,84
8000	20,00	20,00	20,00	20,00	23,85

Como era esperado, a atenuação sonora proporcionada pelas barreiras acústicas é bastante elevada nas freqüências mais altas. Isso reflete a qualidade deste tipo de anteparo na obstrução de ondas sonoras de pequeno comprimento de onda. Já para as freqüências menores, cujos comprimentos de onda são maiores, apesar de a atenuação ocorrer de forma satisfatória, os valores calculados dizem respeito a cerca de 50% da atenuação nas altas freqüências.

6 CONCLUSÕES

Os ensaios efetuados com os ressoadores em câmara reverberante demonstraram que as peças foram corretamente dimensionadas quanto ao seu coeficiente de absorção sonora de Sabine, já que as variações verificadas devem-se, principalmente, à produção artesanal dos ressoadores.

Um ponto de interesse na caracterização dos ressoadores é a possibilidade de ocorrerem duas freqüências de oscilação. Uma mais grave e com impacto de maior proporção na absorção sonora e, outra mais aguda, com absorção menos acentuada do que a primeira, no entanto significativa no conjunto. Sugere-se um estudo mais detalhado neste sentido, pois a confirmação desta possibilidade permitiria o dimensionamento de ressoadores para a absorção de duas freqüências simultaneamente.

Nos que diz respeito aos testes realizados com os modelos, concluiu-se que, as inúmeras simplificações implícitas em um modelo, especialmente em ensaios acústicos, podem mascarar os resultados. Acredita-se que este foi o principal motivo de não terem sido coletados dados conclusivos no monitoramento das barreiras na escala 1:5.

As simulações efetuadas com o programa SoundPLAN® permitiram determinar as regiões de ação dos ressoadores, ou seja, as regiões de aumento da absorção sonora e, portanto, da diminuição dos Níveis de Pressão Sonora. Desta forma concluiu-se que barreiras acústicas construídas com ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora proporcionam uma redução significativa do ruído nesta face da barreira. Este fato conduz à utilização deste tipo de barreira acústica em locais com fluxo de pedestres, terminais ferroviários e rodoviários, pontos de ônibus e túneis. Observa-se que, conforme ensaios realizados em câmara reverberante, os ressoadores de Helmholtz desenvolvidos absorvem com mais eficácia freqüências em torno dos 200 Hz. Isso favorece o emprego dos ressoadores em ambientes expostos ao ruído proveniente do tráfego de veículos, já que este se caracteriza por ser de baixas a médias freqüências, trazendo benefícios em relação ao conforto acústico de usuários de áreas marginais a vias de tráfego intenso.

Verificou-se que, se há a intenção de melhorar a qualidade acústica de ambientes por meio da utilização de barreiras acústicas estando estes ambientes na face da barreira oposta à geração do ruído, é necessário que a barreira esteja próxima aos receptores.

Sugerem-se alguns tópicos para a realização de novos trabalhos:

- ✓ Caracterização detalhada da absorção proporcionada por ressoadores de Helmholtz, em específico pelas peças desenvolvidas neste trabalho.
- ✓ Ensaios com barreiras acústicas de ressoadores de Helmholtz em tamanho real.
- ✓ Estudo do equacionamento do fenômeno de absorção sonora proporcionado pelos ressoadores desenvolvidos quando aplicados em barreiras acústicas.

7 REFERÊNCIAS

ANDERSON, G. S.; KURZE, U. J. **Outdoor sound propagation.** In: Beranek L. L., Vér IL (eds.), Noise and vibration control – principles and applications.New York: John Wiley and Sons, 1992 apud BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 368p.

ARIZMENDI, L. J. **Tratado fundamental de acustica en la edificacion.** Pamplona: EUNSA, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10151:** acústica – avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade – procedimento. Rio de Janeiro 2000.

AUDIOLIST. Disponível em: <http://audiolist.org/forum/kb.php?mode=article&k=30> Acesso em 12 abril 2008.

BENADE, A. H. **Fundamentals of musical acoustics.** New York: Dover, 1990 apud HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 1130p.

BENSON, H. **University Physics.** New York: Wiley, 1996 apud HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 1130p.

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

BETULANI, C. A. **Ondas Sonoras.** Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.if.ufrj.br/teaching/fis2/ondas2/ ondas2.html>. Acesso em: 05 maio 2004.

BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 368p.

BOONE, M. M. **Noise Barrier with a Lamellar Diffractor on Top**. Rio de Janeiro: INTERNOISE, 2005.

BRÜEL & KJÆR. **Literatura em ruído e vibrações.** Disponível em: <http://www.bkpt.com/Literatura.htm> Acesso em: 16 julho 2007.

CAMPOS, R. E. **Real e Virtual.** Disponível em: <http://www.audiodicas.com.br/ jornal_1/jornal_96_.htm> Acesso em: 02 novembro 2005.

CML – Câmara Municipal de Lisboa. **Carta de ruído da cidade de Lisboa:** memória descritiva. Disponível em: <pdm.cm-lisboa.pt/pdf/RPDMLisboa_carta_ruido.pdf> Acesso em: 19 julho 2007.

COMPLAGE, construções e projectos, S.A. Disponível em: <http://www.complage.com /principal.html#> Acesso em: 12 abril 2008.

CRUNELLE, M. **Acoustic history revisited**. Disponível em: <www.sial.rmit.edu.au /Projects/File/Acoustic%20History%20Revisited.pdf>. Acesso em: 12 abril 2008.

DESARNAULDS, V.; LOERINCIK, Y. e CARVALHO, A. P. O. **Efficiency of 13th-century acoustic ceramic pots in two swiss churches.** Portland, Maine: Congresso: NOISE-CON, 2001.

DICIONÁRIO AURÉLIO ELETRÔNICO SÉCULO XXI. Versão 3.0 Editora Nova Fronteira. Novembro, 1999.

EGAN, D. **Architectural acoustics.** New York: McGraw-Hill, 1988 apud VIANNA, N. S. **Absorverdores especiais.** São Paulo: III Seminário de Acústica Contemporânea, 2007. Disponível em: <http://www.amf-brasil.com.br> Acesso em: 03 agosto 2007.

FERNANDES, J. C. **Acústica e ruídos**. 2002. 51f. Apostila – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

FERRAZ NETTO, L. **Motor sônico:** o ar como massa vibrante. Disponível em: <http://www.feiradeciencias.com.br/sala22/motor31.asp> Acesso em: 12 abril 2008.

FERREIRA NETO, M. F. **Estudo de barreiras acústicas ao ar livre, sob a perspectiva de eficiência e qualidade sonora**. 2002. 104f. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FHWA. **Keeping the noise down**: highway traffic noise barriers. Washington: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2001.

GAJA, E. *et al.* **Sampling techniques for the estimation of the annual equivalent noise level under urban traffic conditions.** Applied Acoustics 64, 2003: p.43-53.

GERGES, S. N. Y. **Ruído:** fundamentos e controle. Florianópolis: NR, 2000.

GODINHO, L.; ANTÓNIO, J.; TADEU, A. **3D sound scattering by rigid barriers in the vicinity of tall buildings.** Applied Acoustics 62, 2001: p.1229-1248.

GONZALEZ, M. F. **Acústica.** São Paulo: Bidim Rhodia, 1980 apud BISTAFA, S. R. **Acústica aplicada ao controle do ruído.** São Paulo: Edgard Blücher, 2006. 368p.

GOOGLE EARTH: Image DigitalGlobe. Europa Technologies, 2007. Acesso em: 27 dezembro 2007.

GUEDES, Í. C. M. **Influência da forma urbana em ambiente sonoro:** um estudo no bairro Jardins em Aracaju (SE). 2005. 126f. Dissertação – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

HENDRIKS, R. **Technical Noise Supplement**. Sacramento, CA : Office of Transportation Laboratory, Caltrans, 1998.

HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 1130p.

INTERNATIONAL STANDARD. **ISO 354**. Acoustics – Measurement of sound absorption in a reverberation room, 2003.

JOSSE, R. **La acústica en la construcción**. Barcelona: Gustavo Gili, 1975. 291p.

KENYON COLLEGE. Disponível em: <http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Rudolf_Koenig_Apparatus/Helmholtz_Resonator/Helmholtz_Resonator.html> Acesso em 12 abril 2008.

KLINGNER, R. E.; MCNERNEY, M. T.; BUSCH-VISHNIAC, I. **Design guide for highway noise barriers** – Research Report 0-1471-4. Austin: Texas Department of Transportation e U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2003.

KNIRSCH, J. **Qual a melhor sala para ouvir música?** Disponível em: <http://www.byknirsch.com.br/artigos/06-01-Salaviva-01.htm> Acesso em: 11 julho 2007.

KURZE, U. J. e ANDERSON, G. A. **Sound attenuation by barriers.** Applied Acoustics 4, 1971: p. 35-53 apud KLINGNER, R. E.; MCNERNEY, M. T.; BUSCH-VISHNIAC, I. **Design guide for highway noise barriers** – Research Report 0-1471-4. Austin: Texas Department of Transportation e U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2003.

LAZZARINI, V. E. P. **Elementos de acústica.** Apostila – Departamento de Artes, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 1998. 47p.

LI, K. M., WONG, H. Y. **A review of commonly used analytical and empirical formulae for predicting sound diffracted by a thin screen.** Applied Acoustics 66, 2005: p. 45-76.

MAIA, P. A. **Estimativa de exposições não contínuas a ruído.** Campinas: FUNDACENTRO, 2002.

MORFEY, C. L. **Dictionary of Acoustics.** San Diego: Academic Press, 2001 apud HENRIQUE, L. L. **Acústica Musical**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2002. 1130p.

NOISE METERS. Disponível em: <http://www.noisemeters.com/product/support/octave-bands.asp> Acesso em: 11 julho 2007.

PAZ, E. C. da; FERREIRA, A. M. C.; ZANNIN, P. H. T. Estudo comparativo da percepção do ruído urbano. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 39, n. 3, p. 467-472, junho, 2005.

PREFEITURA MUNICIPAL DE MARINGÁ. **Projeto de Lei Complementar N.º 218/98** Autora: Vereadora Arlene Lima. Maringá, 1998.

PURPUR, J. G. **Controle do tráfego de veículos em Maringá**. Maringá: Secretaria dos Transportes/Prefeitura Municipal de Maringá/JVG-Consultoria e Assessoria Ltda, 1999.

REMY, Nicolas. **Acoustique des salles**. École d'architecture de Grenoble. Disponível em: <www.grenoble.archi.fr/enseignement/cours/remy/L5C/06-acoustique_salle01.pdf> Acesso em: 12 abril 2008.

SAKUMA, T. **Numerical Analysis of the Additional Attenuation Due to the Tops of Edge Modified Barriers**. Rio de Janeiro: INTERNOISE, 2005.

SANTOS, J. L. P. dos. **Estudo do potencial tecnológico de materiais alternativos em absorção sonora**. Santa Maria: Editora da UFSM, 2005.

SEEP, B. **Acústica das salas de sula**: um recurso para criar ambientes de aprendizado com condições desejáveis de audibilidade. Revista de Acústica e Vibrações. Edição Número 29/Julho 2002.

SILVA, P. **Acústica arquitetônica & condicionamento de ar**. 4ª edição. Belo Horizonte: EDTAL – Empresa Acústica Ltda, 2002.

SOUNDPLAN-Manager. Version 6.4®. Braunstein + Berndt GmbH.

SOARES, P. F.; SOARES, D. A. F. **Conforto acústico.** 2003. 62f. Apostila – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.

SQUARE ONE RESEARCH. **Longitudinal wave simulator**. Disponível em: <http://www.squ1.com/>

SUH, S. S.; MONGEAU, L.; BOLTON, J. S. **Study of the performance of acoustic barriers for Indiana Toll Roads**. Report nº FHWA/IN/JTRP-2001/20 – School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette.

TRUE AUDIO. TrueRTA™ – Real Time Áudio Spectrum Analyzer. Disponível em: <http://www.trueaudio.com/rta_abt1.htm>

VIANA, A. **Disciplina edição de áudio I.** 2006. 43f. Apostila – Escola de Música, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

VIRO, G. E. **Protocolo de Mediciones para Trazado de Mapas de Ruido Normalizados**. Buenos Aires: LACEAC – Laboratorio de Acústica y Electroacústica, 2002. 61p.

VITRÚVIO. **The ten books on architecture**. New York: Dover Publications Inc., 1960, libro V, capítulo V apud CRUNELLE, M. **Acoustic history revisited**. Disponível em: <www.sial.rmit.edu.au/Projects/File/Acoustic%20History%20Revisited.pdf>. Acesso em: 12 abril 2008.

WIKIPÉDIA, A enciclopédia livre. **Ouvido.** Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ouvido> Acesso em: 11 julho 2007.

WIKIPÉDIA, A enciclopédia livre. **Barriera antirumore.** Disponível em: <http://it.wikipedia.org/wiki/Barriera_antirumore> Acesso em: 12 abril 2008a.

WIKIPÉDIA, A enciclopédia livre. **Noise barrier.** Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Noise_barrier > Acesso em: 12 abril 2008b.

ANEXO A – TRUERTA™

O programa TrueRTA™ é um analisador do espectro sonoro em tempo real.

Utilizando uma FFT (Tranformada de Fourier) o TrueRTA™ realiza a primeira parte do processo, ou seja, converte o sinal sonoro em espectro por freqüência. A forma com a qual o programa apresenta o domínio temporal é a de um osciloscópio, um instrumento de teste eletrônico habitual para a maioria dos engenheiros acústicos. A freqüência do sinal de entrada é apresentada em um analisador em tempo real com uma resolução ajustável de uma oitava até 1/24 avos de oitava.

O sistema acústico converte o sinal de entrada analógico (um microfone) em um sinal digital que é processado pelo programa utilizado uma FFT para encontrar o nível sonoro em cada banda de freqüência.

Para converter o sinal de saída da FFT em modo RTA (análise em tempo real), primeiramente é encontrada a amplitude em cada fração de oitava. Em seguida é aplicada uma correção ao eixo já que a FFT e o RTA têm diferentes características de medição (Ex: o ruído rosa aparece com uma resposta plana em RTA enquanto a representação em uma FFT tem um decaimento de 3 dB por oitava).

ANEXO B - LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E FÍSICA APLICADA DA UNIVERSIDADE DE CAMPINAS

Descreve-se a seguir a câmara reverberante do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada da Universidade de Campinas quanto à sua geometria.

A Figura B.1 é um esboço da planta baixa da câmara reverberante e auxilia na sua caracterização.

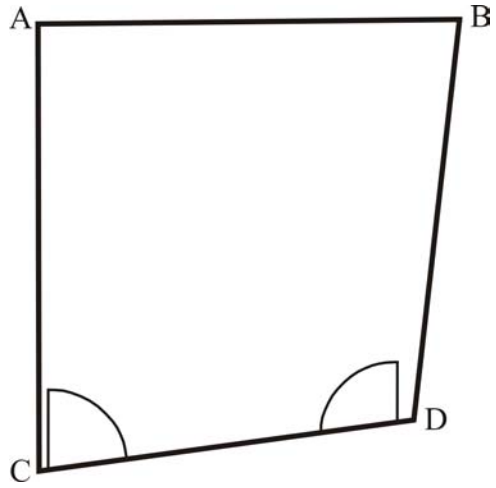


Figura B.1 – Geometria da câmara reverberante

As dimensões da câmara reverberante são as seguintes:

a) Extensão das paredes:

- ✓ AB = 4,78m
- ✓ BD = 4,59m
- ✓ DC = 4,59m
- ✓ CA = 4,78m

b) Altura das paredes:

- ✓ Ponto A = 3,245m
- ✓ Ponto B = 3,305m
- ✓ Ponto C = 3,245m
- ✓ Ponto D = 3,310m

c) Dimensões das portas:

- ✓ 1,985m X 0,955m

d) Áreas:

- ✓ Piso e teto = 21,92m^2
- ✓ Parede AB = 15,65m^2
- ✓ Parede BD = 15,18m^2
- ✓ Parede DC = 15,04m^2
- ✓ Parede CA = 15,51m^2
- ✓ Portas = 1,89m^2
- ✓ Área total = 85,29m^2

e) Áreas:

- ✓ Volume da sala = $[(3{,}245 + 3{,}305 + 3{,}245 + 3{,}310)/4]x21{,}92 = 71{,}8m^3$

ANEXO C – SOUNDPLAN®: PRINCÍPIOS DE CÁLCULO

Os mapas de ruído são criados a partir fontes pontuais, portanto é importante descrever os níveis sonoros calculados para receptores pontuais. Neste caso, todas as fontes são independentes e podem ser calculadas separadamente. A contribuição de cada fonte pode ser adicionada ao nível sonoro emitido utilizando a Equação C.1.

$$L_{i,sum} = 10 * \boldsymbol{log}\left(\sum\left(10^{L_i/10}\right)\right) \qquad \text{(Eq. C.1)}$$

onde:

"L_i" é a contribuição de uma fonte pontual [dB].

A contribuição "L_i"de uma fonte pontual é descrita pela Equação C.2.

$$L_i = L_w - C_1 - C_2 ... C_n \qquad \text{(Eq. C.2)}$$

onde:

"L_i" é a contribuição de uma fonte pontual, ou seja, o nível medido no receptor [dB],

"L_w" é o nível de potência sonora [dB],

"C_1...C_n" são coeficientes que descrevem os aspectos da propagação sonora.

O nível sonoro em um receptor deriva da potência sonora e da propagação. Os coeficientes considerados são de propagação sonora, absorção do ar, difração, efeito de absorção do solo e reflexão. Ao considerar-se uma rodovia ou avenida como fonte sonora, ter-se-á uma fonte do tipo linear.

1. PROPAGAÇÃO SONORA

A definição de potência sonora é baseada na energia distribuída através de uma esfera com a área superficial de um metro quadrado. Conforme a distância a partir da fonte aumenta, a área da superfície também aumenta. Com a regra $Área = 4 * \pi * R^2$ a propagação de uma esfera a qualquer distância da fonte sonora é dada por: $10 * \boldsymbol{log}\left(R_0 / \left(4 * \pi * R^2\right)\right)$. Na maioria dos casos, as distâncias R_0 e $4*\pi$ são substituídas por 11dB e o quadrado da

distância é colocado na frente da equação. A divisão no logaritmo é substituída por uma multiplicação por -1. O resultado na fórmula é $-11-20*\boldsymbol{log}(R)$.

Quando a fonte linear é muito mais longa que a distância da fonte ao receptor, a propagação é calculada a partir da fonte linear e aumenta somente em duas dimensões (Figura C.1). Com o aumento da distância as características de propagação aproximam-se de uma fonte pontual.

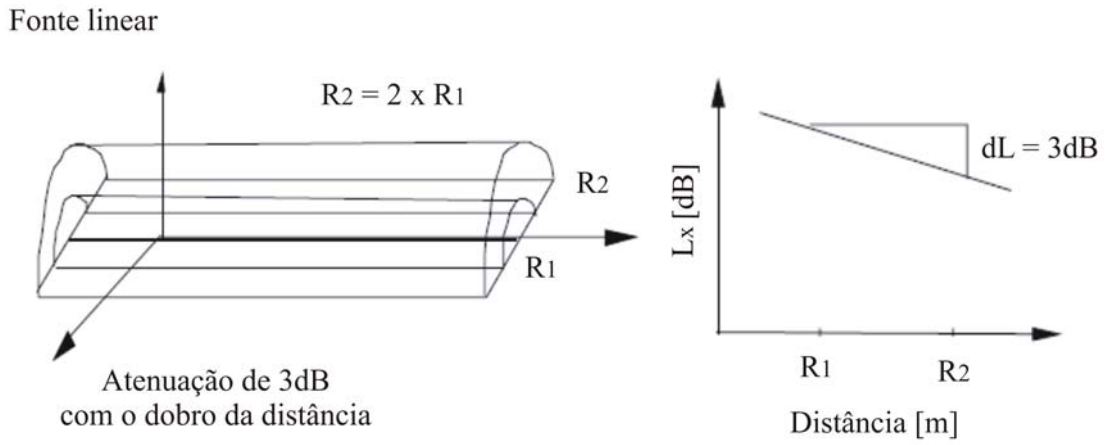


Figura C.1 – Propagação sonora para uma fonte linear

2. ABSORÇÃO DO AR

O ar, assim como os outros meios, não permite que as ondas sonoras se propaguem sem perdas. As perdas dependem da freqüência, temperatura, umidade relativa do ar e altitude. Neste caso utilizou-se a norma ISO 9613 para avaliar a absorção sonora. Os valores são calculados por meio de fórmulas derivadas das curvas de relaxamento do Nitrogênio e Oxigênio. Temperatura, umidade, freqüência e pressão são parâmetros contribuintes no cálculo.

3. DIFRAÇÃO

A difração ocorre quando uma onda sonora atinge a extremidade de um obstáculo, podendo esta extremidade ser horizontal ou vertical. Esta função avalia os parâmetros de freqüência e o caminho extra percorrido pela onda sonora ao contornar um obstáculo (*"distância da fonte ao topo da barreia"* mais *"distância do topo da barreira ao receptor"* menos *"distância da fonte até o receptor"*).

Para grandes distâncias o caminho extra percorrido pela onda sonora conduz a uma superestimativa da difração sonora, fato este devido à atmosfera. Como a pressão do ar diminui com o aumento da altitude, a atmosfera curva as ondas sonoras em direção ao chão. Isso significa que o som viaja por uma trajetória curva e não uma linha reta. Em grandes distâncias o caminho extra para trajetórias curvas é muito menor do que para uma trajetória retilínea entre fonte e receptor.

No SoundPLAN® o efeito da difração é considerado em barreiras, elevações do terreno e objetos refletores. Mesmo barreiras com altura próxima de zero são consideradas. É recomendado gerar um modelo do terreno com curvas de nível já que são avaliados o efeito de barreira e de absorção do solo.

No que diz respeito à difração lateral, o SoundPLAN® considera somente a difração para as interações diretas entre fonte e receptor. Para as reflexões será avaliada somente a difração vertical.

4. EFEITO DO SOLO, K_Ω

Uma onda sonora interage com o solo ao percorrer uma trajetória próxima a ele. A onda é refletida e absorvida e podem ocorrer interferências entre a onda direta e a refletida. Segundo a norma ISO 9613 se uma fonte sonora está sobre uma superfície refletora, a propagação não será esférica, mas sim uma meia esfera. Também é considerado que todas as energias refletidas sobre um chão duro duplicam-se, assim como os níveis sonoros para as ondas propagadas (adição de 3 dB). Se a fonte sonora estiver localizada no encontro de duas paredes, a propagação se fará pela superfície de um quarto de esfera, novamente duplicando o nível de ruído para a propagação com a adição de 3 dB. Esta adição será de 0dB para uma fonte distante de qualquer superfície refletora. Estas correções são tabeladas em norma e recebem a denominação K_Ω. Está implícito nas fórmulas que consideram o efeito do solo a inclusão da correção. Na Tabela C.1 apresentam-se os valores de K_Ω empregados de acordo com a geometria.

Tabela C.1 – Valores de K_Ω para diferentes geometrias

K_Ω	Caso de aplicação
0 dB(A)	Propagação esférica. Exemplo: fumaça de cigarro
+3 dB(A)	Propagação em meia esfera. Exemplo: empilhadeira trabalhando em superfície dura.
+6 dB(A)	Propagação em um quarto de esfera. Exemplo: fonte sonora no encontro de duas paredes.
+9 dB(A)	Propagação em um oitavo de esfera. Exemplo: ventilador em um canto (encontro de duas paredes e teto)

5. REFLEXÃO

O princípio da reflexão é: ângulo de incidência igual a ângulo de reflexão. Os ângulos de incidência e reflexão considerados são no pavimento e na terceira dimensão. Os ângulos não são o único critério que qualifica a reflexão de um plano. O tamanho do objeto deve ser no mínimo do tamanho da metade de um comprimento de onda, senão a onda sonora será absorvida. Esta restrição também é aplicada às duas dimensões. Se uma onda sonora incidir um plano com um ângulo maior que 85 graus também não será refletida.

Associada à reflexão está associada uma perda de energia da onda sonora: a parcela de energia absorvida pela superfície de incidência da onda. A absorção é uma característica do material que deve ser fornecida por ocasião da modelagem no SoundPLAN®.

6. O MÉTODO DA PESQUISA POR ÂNGULO

O SoundPLAN® utiliza um método de busca por setores. A partir do receptor faz uma varredura em raios detectando a geometria das fontes, reflexões, barreiras e atenuação do solo. A varredura foi feita com um ângulo de incremento constante de dois graus.

7. VELOCIDADE VERSUS PRECISÃO

Dependendo da distância entre fonte e receptor ou um obstáculo, uma parte de uma fonte ou o afastamento entre edifícios podem não ser reconhecidos corretamente. Esta parcela ser estenderá a no máximo metade de um incremento de ângulo. Esta é uma falha entre o tempo de cálculo e a precisão dos resultados. No esquema apresentado na Figura C.2 apresenta-se uma aproximação da influência deste erro nos resultados da simulação.

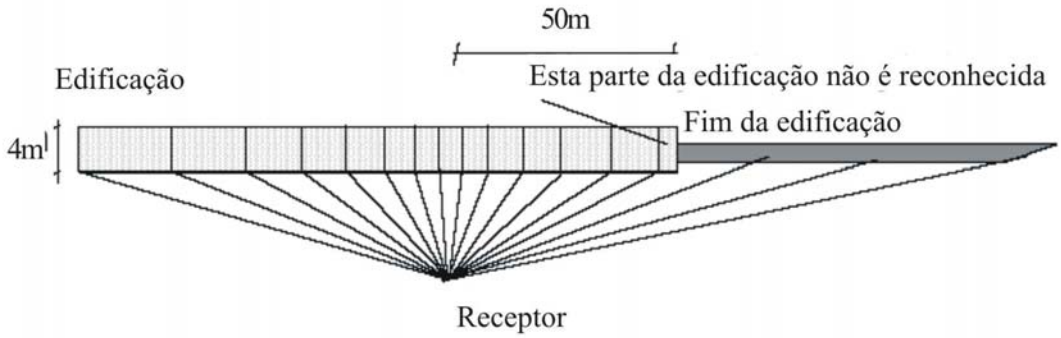


Figura C.2 – Divisão da geometria na pesquisa por ângulos

A precisão de cálculo sempre é alta próximo ao receptor. Conforme aumenta a distância em relação ao receptor diminui a precisão dos resultados.

ANEXO D – NORMA ALEMÃ RLS - 90

Transcrevesse aqui o Anexo A de Guedes (2005).

1. INTRODUÇÃO

O RLS - 90 utiliza o método da fonte pontual com espalhamento, atenuação sonora, refração e reflexão. Seus procedimentos de cálculo apresentam dois modelos: da fonte e da propagação. Com relação ao modelo da fonte são usados dados de tráfego para predizer o nível de ruído referencial em 25 metros de distância da estrada (L_{25}) e 4 metros acima do solo. Já o modelo da propagação tem como dados de entrada a emissão média durante o dia e a noite, resultando em níveis de ruído no receptor durante os respectivos períodos.

2. O NÍVEL L_{25}

Os dados necessários para se calcular o nível sonoro L_{25} são: (i) dados de tráfego (número de veículos por hora, porcentagem de veículos pesados), (ii) velocidade dos veículos leves e velocidade dos veículos pesados, (iii) ajustes devido à superfície da rua, (iv) gradiente da rua, (v) adições devido às múltiplas reflexões.

O L_{25} é calculado por:

$$L_{25} = L_{25Básico} + C_{velocidade} + C_{\sup erfície} + C_{gradiente} + C_{reflexões}$$

O L_{25} básico é o nível sonoro normalizado para as seguintes condições: (i) superfície asfáltica lisa, (ii) gradiente menor que 5 %, (iii) propagação sonora em campo livre.

$$L_{25básico} = 37{,}3 + 10\log(I.(1 + 0{,}082.P))$$

Onde:

I é o tráfego horário médio de veículos.

P é a porcentagem de veículos pesados que excedem 2,8 toneladas.

2.1. Correção $C_{velocidade}$

A correção ocorre segundo a fórmula:

$$C_{velocidade} = \frac{L_{leve} - 37{,}3 + 10.\log[(100 + (10^{0{,}1C}).P)]}{(100 + 8{,}23.P)}$$

Onde:

$$C = L_{pesado} - L_{leve}$$
$$L_{leve} = 27{,}8 + 10.\log(1 + (0{,}02.V_{leve})^3)$$
$$L_{pesado} = 23{,}1 + 12{,}5.\log(V_{pesado})$$
$$V_{leve} = velocidade\ \ dos\ \ veículos\ \ leves$$
$$V_{pesado} = velocidade\ \ dos\ \ veículos\ \ pesados.$$

2.2. Correção devido à superfície da rua - $C_{superfície}$

As adições devido ao tipo superfície da pista são indicadas na Tabela B.1.

Tabela B.1 – Correção devido à superfície da rua

Tipo de Piso	Correção
Asfalto liso	0
Asfalto rugoso, concreto	+1,5
Paralelepípedo liso	+2,5
Outros paralelepípedos	+4,5

2.3. Correção devido ao gradiente da rua - $C_{gradiente}$

$$C_{gradiente} = 0$$

se o gradiente for menor que 5%

$$C_{gradiente} = 0{,}6|g| - 3$$

se o gradiente, dado em porcentagem, for maior que 5%, onde g é o gradiente da rua.

2.4. Correção devido às múltiplas reflexões - $C_{reflexões}$

$$C_{reflexões} = 4\frac{h}{d}$$

Onde:

h é a altura da parede

d é a distância entre as paredes

$C_{reflexões}$ < 3,2dB para superfícies refletoras

$$C_{reflexões} = 2\frac{h}{d}\ 3{,}2\text{dB}$$

$C_{reflexões}$ < 1,6dB para superfícies absorventes

APÊNDICE A – DADOS COLETADOS NA CÂMARA ACÚSTICA

Apresentam-se, neste apêndice, todos os dados de tempo de reverberação, temperatura e umidade coletados na câmara acústica.

Tabela A.1 – Tempos de reverberação na câmara acústica com painel de ressoadores sem vedação das juntas e com fonte sonora na posição F1

Freq. [Hz]	Tempo de reverberação em cada ponto de coleta de dados [s]												Média T60 [s]	Desvio Padrão
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		
63	16,88	15,92	14,8	9,65	10,23	10,75	14,81	15,09	18,84	12,15	10,79	14,13	13,67	2,79
80	17,4	15,79	14,9	9,72	7,93	9,03	14,77	15,24	15,74	11,47	11,57	13,17	13,06	2,92
100	12,02	7,05	11,66	11,99	9,55	11,93	11,81	8,57	11,87	10,82	10,86	11,11	10,77	1,52
125	7,36	6,95	9,22	8,88	8,31	8,26	8,08	6,59	7,47	8,42	8,71	8,42	8,05	0,76
160	8,94	9,14	8,31	8,88	10,97	9,1	7,32	7,7	7,12	9,01	7,05	9,14	8,55	1,07
200	8,01	7,66	8,26	8,46	8,21	9,2	7,99	7,78	7,94	8,95	9,03	9,08	8,38	0,52
250	7,65	7,66	7,61	7,76	7,17	7,73	7,22	6,83	6,96	8,03	7,46	7,97	7,5	0,36
315	7,76	7,23	8,36	8	6,57	6,42	5,9	5,65	5,87	5,94	5,74	5,91	6,61	0,93
400	7,24	6,83	6,85	6,24	5,89	6,24	5,7	5,62	5,7	5,57	5,55	5,33	6,06	0,59
500	5,17	4,95	5,06	4,95	4,78	4,97	5,05	5,06	5,04	5,3	5,35	5,05	5,06	0,14
630	3,96	4,04	4,01	3,72	3,65	3,7	4,01	3,97	3,99	3,75	3,74	3,39	3,82	0,19
800	2,84	2,82	2,84	2,77	2,77	2,72	2,84	2,8	2,8	2,8	2,77	2,89	2,8	0,04
1 k	2,36	2,33	2,31	2,43	2,38	2,42	2,53	2,62	2,55	2,49	2,5	2,34	2,43	0,09
1,25 k	2,47	2,42	2,45	2,39	2,4	2,36	2,5	2,5	2,51	2,5	2,5	2,38	2,44	0,05
1,6 k	2,67	2,78	2,68	2,62	2,61	2,61	2,73	2,7	2,69	2,75	2,74	2,76	2,69	0,05
2 k	2,45	2,5	2,47	2,46	2,41	2,43	2,41	2,4	2,42	2,56	2,6	2,67	2,48	0,08
2,5 k	2,55	2,6	2,65	2,52	2,54	2,51	2,56	2,54	2,56	2,59	2,61	2,65	2,57	0,04
3,15 k	2,53	2,46	2,43	2,48	2,53	2,51	2,57	2,54	2,58	2,4	2,42	2,48	2,49	0,05
4 k	2,18	2,21	2,23	2,24	2,25	2,23	2,3	2,39	2,35	2,26	2,27	2,18	2,25	0,06
5 k	2,02	2,02	2,06	1,96	2,02	2,02	2,04	2,09	2,05	1,96	1,98	2,03	2,02	0,03
6,3 k	1,6	1,64	1,61	1,57	1,57	1,53	1,62	1,65	1,65	1,61	1,65	1,74	1,62	0,05
8 k	1,39	1,38	1,4	1,27	1,32	1,34	1,31	1,37	1,34	1,44	1,41	1,3	1,35	0,04
10 k	1,13	1,12	1,11	1,1	1,12	1,11	1,16	1,15	1,15	1,15	1,17	1,11	1,13	0,02

Tabela A.2 – Tempos de reverberação na câmara acústica com painel de ressoadores sem vedação das juntas e com fonte sonora na posição F2

Freq. [Hz]	Tempo de reverberação em cada ponto de coleta de dados [s]												Média T60 [s]	Desvio Padrão
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		
63	16,36	15,8	19,87	8,98	7,93	7,13	14,7	14,63	14,35	8,03	8,55	10,51	12,23	4,01
80	17,17	17,88	18,51	12,78	7,16	5,45	14,97	14,27	15,49	13,74	8,3	9,28	12,91	4,19
100	12,21	11,73	12,16	12,48	12,11	10,88	12,14	12,45	12,43	12,58	12,63	12,19	12,16	0,45
125	8,04	7,07	7,96	7,32	7,56	7,53	8,51	8,51	9,67	8,65	7,86	8,79	8,12	0,7
160	9,57	10,25	8,61	7,98	8,68	9,5	7,06	7,35	7,28	7,66	9,23	8,99	8,51	0,99
200	10,92	11,59	10,3	9,65	9,62	9,59	6,55	6,62	6,61	9,04	8,87	9,07	9,03	1,59
250	6,52	6,95	6,78	7,47	7,56	7,8	6,91	6,94	6,79	7,37	7,4	7,48	7,16	0,37
315	6,64	5,82	5,61	5,08	5	5,27	5,77	5,84	5,96	5,58	5,52	5,63	5,64	0,41
400	5,11	5,19	4,92	5,19	5,03	5,38	5,32	5,37	5,56	5,16	5,14	5,35	5,22	0,16
500	5,1	5,01	5,06	4,92	4,95	4,93	5,03	5,03	5,04	5,11	5,15	5,09	5,03	0,07
630	3,57	3,58	3,47	3,69	3,71	3,73	3,49	3,56	3,74	3,83	3,83	3,92	3,67	0,13
800	2,97	3,03	3,03	2,9	2,93	3,02	2,77	2,86	2,7	2,8	2,79	2,84	2,88	0,1
1 k	2,42	2,46	2,49	2,39	2,38	2,43	2,31	2,3	2,37	2,24	2,23	2,18	2,35	0,09
1,25 k	2,56	2,55	2,48	2,37	2,31	2,42	2,39	2,4	2,47	2,51	2,5	2,52	2,45	0,07
1,6 k	2,78	2,72	2,66	2,75	2,73	2,8	2,58	2,62	2,63	2,82	2,78	2,84	2,72	0,08
2 k	2,44	2,44	2,52	2,67	2,61	2,57	2,57	2,53	2,49	2,5	2,49	2,5	2,52	0,06
2,5 k	2,48	2,49	2,49	2,62	2,58	2,57	2,53	2,57	2,51	2,54	2,55	2,57	2,54	0,04
3,15 k	2,44	2,42	2,39	2,43	2,51	2,51	2,47	2,49	2,45	2,39	2,38	2,4	2,44	0,04
4 k	2,36	2,3	2,31	2,21	2,21	2,16	2,21	2,23	2,21	2,33	2,38	2,35	2,27	0,07
5 k	1,99	1,96	1,96	2,06	2,04	1,99	2,03	2,08	2,1	2,01	1,99	2	2,01	0,04
6,3 k	1,7	1,61	1,67	1,73	1,73	1,68	1,69	1,74	1,69	1,67	1,65	1,68	1,68	0,03
8 k	1,35	1,33	1,31	1,39	1,38	1,39	1,35	1,34	1,35	1,28	1,28	1,35	1,34	0,03
10 k	1,16	1,16	1,11	1,14	1,1	1,11	1,18	1,13	1,11	1,13	1,13	1,16	1,13	0,02

Tabela A.3 – Tempos de reverberação na câmara acústica com painel de ressoadores com vedação das juntas e com fonte sonora na posição F1

Freq.	Tempo de reverberação em cada ponto de coleta de dados [s]												Média	Desvio
[Hz]	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	T60 [s]	Padrão
63	15,11	14,16	11,21	15,16	15,33	16,45	15,84	15,61	16,41	12,93	13,13	14,38	14,64	1,5
80	15,13	13,98	11,89	15,9	15,35	16,27	15,68	15,4	16,28	15,53	16,06	15,37	15,23	1,16
100	11,33	12,42	7,07	12,08	11,38	11,55	12,27	6,79	12,08	10,46	11,9	11,66	10,91	1,85
125	8,77	8,82	7,2	8,65	7,86	7,69	7,35	6,03	7,82	7,42	8,29	6,91	7,73	0,79
160	8,43	8,49	10,07	8,77	8,1	8,06	7,69	7,42	7,15	10,13	7,81	9,99	8,5	0,99
200	9,21	8,84	7,94	7,42	9,48	9,27	7,62	7,71	8,05	8,57	8,66	8,7	8,45	0,66
250	8,31	8,22	7,62	7,72	7,76	8,28	6,41	6,66	7,39	7,5	7,86	7,38	7,59	0,56
315	5,79	5,84	7,86	6,01	5,85	5,59	5,92	5,48	5,9	5,47	5,96	5,45	5,92	0,61
400	6,66	6,21	6,48	5,66	5,72	5,81	5,33	5,6	5,59	5,42	5,18	5,29	5,74	0,45
500	5,13	5,07	5,01	4,82	4,92	4,89	4,73	4,84	4,79	4,74	4,69	4,62	4,85	0,14
630	3,95	3,88	3,83	3,65	3,66	3,72	3,54	3,59	3,59	3,23	3,38	3,41	3,61	0,2
800	2,62	2,56	2,56	2,57	2,57	2,6	2,61	2,6	2,62	2,62	2,57	2,63	2,59	0,02
1 k	2,44	2,46	2,47	2,43	2,53	2,51	2,52	2,58	2,47	2,51	2,47	2,47	2,48	0,04
1,25 k	2,59	2,59	2,59	2,72	2,66	2,64	2,91	2,93	2,86	2,61	2,59	2,66	2,69	0,12
1,6 k	2,92	2,84	2,92	2,98	2,95	2,95	3,09	3,09	3,09	2,94	2,9	2,88	2,96	0,08
2 k	2,56	2,6	2,61	2,71	2,72	2,71	2,5	2,54	2,57	2,74	2,78	2,79	2,65	0,09
2,5 k	2,62	2,69	2,72	2,59	2,65	2,63	2,62	2,6	2,55	2,73	2,71	2,69	2,65	0,05
3,15 k	2,45	2,47	2,45	2,52	2,53	2,51	2,57	2,55	2,53	2,43	2,39	2,45	2,48	0,05
4 k	2,33	2,28	2,26	2,32	2,28	2,25	2,2	2,29	2,27	2,25	2,22	2,25	2,26	0,03
5 k	2,06	2,07	2,05	1,97	2,04	2,01	2,14	2,15	2,16	1,94	1,96	1,94	2,04	0,07
6,3 k	1,65	1,57	1,59	1,67	1,63	1,61	1,74	1,75	1,77	1,82	1,76	1,77	1,69	0,08
8 k	1,34	1,3	1,3	1,27	1,28	1,3	1,34	1,31	1,33	1,38	1,4	1,38	1,32	0,04
10 k	1,1	1,07	1,11	1,1	1,1	1,1	1,08	1,09	1,1	1,11	1,11	1,11	1,09	0,01

Tabela A.4 – Tempos de reverberação na câmara acústica com painel de ressoadores com vedação das juntas e com fonte sonora na posição F2

Freq. [Hz]	Tempo de reverberação em cada ponto de coleta de dados [s]												Média T60 [s]	Desvio Padrão
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		
63	8,68	7,25	8,91	8,71	9,44	8,33	14,38	10,52	11,87	9,21	8,35	8,84	9,54	1,83
80	9,2	7,37	9,71	9,87	9,53	8,58	12,91	10,98	13,36	8,2	6,16	5,15	9,25	2,33
100	12,22	11,68	12,79	12,56	12,57	12,65	12,94	12,98	12,67	12,17	12,9	12,3	12,53	0,36
125	9,2	7,22	9,76	7,9	9,84	6,94	9,52	9,9	7,32	10,22	7,02	6,79	8,46	1,31
160	9,02	10,02	8,83	9,64	9,87	9,18	7,97	8,07	8,21	10,11	8,52	10,57	9,16	0,83
200	9,65	10,48	8,54	10,11	10,5	10,27	6,87	8,49	7,62	10,35	10	9,79	9,38	1,16
250	6,85	6,42	6,97	7,5	7,55	7,72	7,13	6,89	6,96	7,26	7,7	7,32	7,18	0,37
315	7,34	6,17	7,07	5,21	6,1	5,26	6,07	5,93	5,88	5,38	5,27	5,36	5,92	0,67
400	5,52	5,4	5,54	4,98	4,86	4,91	5,44	5,62	5,71	5,27	5,16	5,03	5,28	0,28
500	5,07	5,08	5,07	4,77	5,02	4,87	4,89	4,87	4,92	4,94	4,88	4,79	4,93	0,1
630	3,51	3,63	3,53	3,71	3,73	3,76	3,54	3,63	3,57	3,62	3,88	3,9	3,66	0,12
800	2,71	2,64	2,72	2,87	2,77	2,79	2,66	2,77	2,69	2,46	2,64	2,58	2,69	0,1
1 k	2,5	2,49	2,56	2,58	2,56	2,54	2,46	2,48	2,48	2,33	2,42	2,36	2,48	0,07
1,25 k	2,77	2,76	2,72	2,59	2,61	2,63	2,74	2,65	2,61	2,81	2,84	2,77	2,7	0,08
1,6 k	3,03	2,97	3,03	2,92	2,94	2,92	2,8	2,8	2,79	3,07	3,07	3,05	2,94	0,1
2 k	2,58	2,55	2,57	2,85	2,79	2,75	2,57	2,47	2,53	2,62	2,59	2,56	2,61	0,11
2,5 k	2,59	2,63	2,59	2,54	2,55	2,54	2,6	2,55	2,55	2,64	2,57	2,61	2,58	0,03
3,15 k	2,47	2,57	2,54	2,55	2,57	2,57	2,59	2,64	2,61	2,48	2,51	2,48	2,54	0,05
4 k	2,24	2,13	2,16	2,21	2,21	2,22	2,25	2,25	2,32	2,4	2,46	2,4	2,27	0,09
5 k	2,1	2,07	2,11	2,05	2,08	2,05	2,1	2,01	2,05	2,1	2,04	2,12	2,07	0,03
6,3 k	1,58	1,62	1,62	1,74	1,72	1,71	1,64	1,65	1,61	1,67	1,68	1,64	1,65	0,04
8 k	1,35	1,28	1,36	1,35	1,36	1,36	1,22	1,3	1,26	1,37	1,35	1,35	1,32	0,04
10 k	1,08	1,08	1,12	1,1	1,09	1,06	1,01	1,01	1,03	1,07	1,12	1,08	1,07	0,03

Tabela A.5 – Tempos de reverberação com a câmara acústica vazia e com fonte sonora na posição F1

Freq. [Hz]	Tempo de reverberação em cada ponto de coleta de dados [s]												Média T60 [s]	Desvio Padrão
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		
63	18,82	15,3	15,37	16,7	16,17	15,34	16,09	16,45	N/A	17,02	17,08	15,99	16,39	0,97
80	14,75	15,23	15,64	17,58	16,51	16,4	15,65	16,37	16,74	18,07	16,54	16,47	16,32	0,89
100	12,59	12,86	12,9	12,82	12,14	12,52	12,88	11,97	12,12	12,91	8,64	12,56	12,24	1,13
125	10,51	7,69	10,55	9,69	9,48	6,97	9	7,99	7,96	9,78	7,47	9,31	8,86	1,16
160	9,69	9,64	9,4	10,24	9,87	8,1	8,31	7,89	8,29	9,1	10,2	9,33	9,17	0,79
200	9,3	9,49	9,84	12,02	11,99	12,17	9,47	9,1	8,72	11,83	11,85	11,39	10,59	1,31
250	8,92	8,55	9,98	8,83	8,36	8,73	7,72	8,27	8,35	8,55	8,79	8,85	8,65	0,51
315	8,94	8,5	9,35	7,2	7,79	7,09	5,71	5,8	5,97	7,1	6,72	6,84	7,25	1,14
400	7,96	7,43	7,33	5,91	5,87	6,15	6,52	6,49	6,59	7,84	8,18	7,65	6,99	0,79
500	5,51	5,59	5,27	5,56	5,57	5,51	5,56	5,65	5,97	5,44	5,36	5,21	5,51	0,18
630	4,45	4,29	4,4	4,28	4,32	4,27	4,44	4,59	4,62	4,19	4,34	4,33	4,37	0,12
800	3,55	3,49	3,5	3,51	3,53	3,49	3,37	3,4	3,42	3,66	3,71	3,76	3,53	0,11
1 k	3,49	3,49	3,51	3,35	3,38	3,32	3,42	3,46	3,43	3,5	3,47	3,46	3,44	0,05
1,25 k	3,52	3,46	3,5	3,45	3,52	3,43	3,25	3,27	3,27	3,5	3,47	3,48	3,42	0,09
1,6 k	3,51	3,53	3,53	3,63	3,63	3,59	3,46	3,53	3,51	3,61	3,64	3,65	3,56	0,06
2 k	2,87	2,88	2,89	3,11	3,12	3,13	3,16	3,16	3,17	3,04	3,08	3,06	3,05	0,1
2,5 k	2,8	2,79	2,74	2,99	2,97	2,98	2,8	2,8	2,84	2,78	2,73	2,74	2,83	0,09
3,15 k	2,69	2,7	2,71	2,65	2,67	2,6	2,79	2,81	2,81	2,68	2,7	2,7	2,7	0,06
4 k	2,52	2,55	2,54	2,58	2,55	2,59	2,46	2,52	2,53	2,48	2,48	2,48	2,52	0,04
5 k	2,09	2,07	2,07	2,14	2,15	2,16	2,25	2,24	2,24	2,11	2,1	2,13	2,14	0,06
6,3 k	1,77	1,91	1,78	1,78	1,8	1,77	1,73	1,72	1,71	1,82	1,83	1,81	1,78	0,05
8 k	1,52	1,48	1,5	1,48	1,49	1,45	1,51	1,48	1,47	1,45	1,49	1,46	1,48	0,02
10 k	1,29	1,16	1,17	1,19	1,19	1,17	1,16	1,17	1,18	1,27	1,28	1,26	1,2	0,04

Tabela A.6 – Tempos de reverberação com a câmara acústica vazia e com fonte sonora na posição F2

Freq. [Hz]	Tempo de reverberação em cada ponto de coleta de dados [s]												Média T60 [s]	Desvio Padrão
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12		
63	10,26	17,79	10,34	10,49	12,67	10,29	13,36	7,8	12,41	10,07	10,17	10,6	11,35	2,39
80	11,47	13,61	10,4	10,56	12,46	10,68	12,46	11,04	12,8	9,69	10,94	10,58	11,39	1,12
100	13,32	13,01	13,13	13,4	13,34	13,15	13,62	13,63	13,35	12,84	12,44	13,19	13,2	0,31
125	9,71	9,89	7,28	8,42	10,09	7,75	8,39	8,12	9,55	8,62	10,9	7,56	8,85	1,09
160	9,24	9,21	10	11,97	10,13	11,61	9,01	9,02	8,32	11,29	10,7	11,92	10,2	1,21
200	9,8	10,06	10,08	12,02	12,19	11,96	9,59	9,5	9,06	11,61	11,63	12,14	10,8	1,16
250	7,25	7,27	7,07	8,37	7,63	8,38	7,68	7,44	7,54	8,36	8,34	7,68	7,75	0,46
315	6,65	6,17	6,74	6,67	6,56	6,73	6,15	6,16	5,97	5,99	6,06	6,16	6,33	0,29
400	5,91	6,11	6,02	6,21	5,82	6,24	6,25	6,25	6,05	6,1	5,68	6,14	6,06	0,17
500	5,56	5,32	5,39	5,61	5,5	5,35	6,14	6,02	5,87	5,6	5,45	5,67	5,62	0,25
630	4,34	4,2	4,32	4	3,99	3,99	4,1	4,15	4,12	4,63	4,55	4,58	4,24	0,22
800	3,44	3,28	3,31	3,53	3,61	3,48	3,51	3,49	3,53	3,64	3,55	3,57	3,49	0,1
1 k	3,47	3,56	3,53	3,7	3,71	3,74	3,34	3,38	3,33	3,51	3,43	3,52	3,51	0,13
1,25 k	3,38	3,44	3,35	3,34	3,38	3,33	3,36	3,42	3,39	3,37	3,35	3,39	3,37	0,03
1,6 k	3,65	3,79	3,75	3,55	3,62	3,58	3,24	3,35	3,32	3,39	3,39	3,41	3,5	0,17
2 k	2,99	2,9	2,89	3,03	2,98	3	3,04	3,05	3,05	3,14	3,09	3,13	3,02	0,07
2,5 k	2,81	2,83	2,75	2,81	2,84	2,86	2,8	2,81	2,82	2,84	2,82	2,87	2,82	0,02
3,15 k	2,71	2,69	2,75	2,56	2,65	2,6	2,68	2,63	2,66	2,76	2,7	2,71	2,67	0,05
4 k	2,64	2,53	2,49	2,43	2,48	2,43	2,52	2,51	2,48	2,37	2,38	2,39	2,47	0,07
5 k	2,1	2,13	2,16	2,16	2,1	2,11	2,11	2,17	2,13	2,02	2,03	2,04	2,1	0,04
6,3 k	1,7	1,7	1,7	1,78	1,79	1,77	1,76	1,79	1,78	1,74	1,8	1,77	1,75	0,03
8 k	1,49	1,51	1,45	1,47	1,48	1,46	1,5	1,45	1,45	1,39	1,4	1,36	1,45	0,04
10 k	1,19	1,17	1,2	1,13	1,13	1,12	1,15	1,12	1,15	1,18	1,19	1,18	1,15	0,02

Tabela A.7 – Umidade relativa e temperatura na câmara reverberante durante os ensaios

Medida	Data	Horário	Umidade Relativa [%]	Temperatura [°C]
1	11/12/2007	11:00	71,0	26,1
2	11/12/2007	11:10	71,8	26,1
3	11/12/2007	11:20	73,6	26,2
4	11/12/2007	11:30	73,8	26,3
5	11/12/2007	11:40	74,7	26,3
6	11/12/2007	11:50	73,6	26,3
7	11/12/2007	12:00	73,8	26,4
8	11/12/2007	12:10	73,3	26,4
9	11/12/2007	12:20	72,3	26,5
10	11/12/2007	12:30	71,5	26,6
11	11/12/2007	12:40	70,9	26,6
12	11/12/2007	12:50	70,6	26,5
13	11/12/2007	13:00	70,5	26,5
14	11/12/2007	13:10	70,4	26,5
15	11/12/2007	13:20	69,9	26,5
16	11/12/2007	13:30	67,8	26,5
17	11/12/2007	13:40	65,9	26,4
18	11/12/2007	13:50	65,5	26,4
19	11/12/2007	14:00	65,0	26,4
20	11/12/2007	14:10	64,6	26,4
21	11/12/2007	14:20	64,2	26,4
22	11/12/2007	14:30	63,9	26,4
23	11/12/2007	14:40	63,7	26,4
24	11/12/2007	14:50	63,9	26,4
25	11/12/2007	15:00	63,9	26,5
26	11/12/2007	15:10	64,1	26,5
27	11/12/2007	15:20	64,9	26,6
28	11/12/2007	15:30	65,2	26,6
29	11/12/2007	15:40	65,1	26,6
30	11/12/2007	15:50	65,9	26,6
31	11/12/2007	16:00	66,8	26,6
32	11/12/2007	16:10	68,3	26,6
33	11/12/2007	16:20	68,6	26,6
34	11/12/2007	16:30	70,4	26,7
35	11/12/2007	16:40	70,6	26,8
36	11/12/2007	16:50	70,8	26,8
37	11/12/2007	17:00	70,3	26,7
38	11/12/2007	17:10	72,3	26,7
39	11/12/2007	17:20	73,3	26,7
40	11/12/2007	17:30	72,9	26,7
41	11/12/2007	17:40	72,0	26,6
42	11/12/2007	17:50	71,9	26,6
43	11/12/2007	18:00	74,1	26,6

APÊNDICE B – DADOS COLETADOS DURANTE O MONITORAMENTO DE NPS NAS BARREIRAS NA ESCALA 1:5

Apresentam-se, neste apêndice, os valores de NPS coletados durante o monitoramento efetuada nas barreiras na escala 1:5. Nas Tabelas B.2, B.3, B.4 e B.5 encontram-se os dados fornecidos pelos medidores de NPS da 01dB®.

Tabela B.2 – Dados do monitoramento sem barreira acústica

Monitoramento sem barreira acústica - 21/12/2007							
Posição		**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**
Início		14h 59min	15h 07min	15h 14min	15h 21min	15h 28min	15h 34min
Fim		15h 03min	15h 11min	15h 18min	15h 25min	15h 32min	15h 38min
A [dB(A)]		80,8	77,3	75,5	75,3	74,6	73,6
C [dB(C)]		86,6	83,7	82,0	82,0	81,2	80,3
Lin [dB]		87,2	84,0	82,3	82,6	81,5	80,8
Nível de Pressão Sonora - NPS [dB]							
Freqüência [Hz]	**31,5**	62,8	62,6	58,8	61,7	61,8	61,9
	63	66,0	64,9	63,9	65,3	67,4	66,3
	125	80,7	77,9	75,9	75,9	75,3	74,4
	250	84,0	80,9	79,1	79,2	78,5	77,5
	500	77,3	73,8	73,3	73,3	75,1	71,6
	1k	68,6	64,1	62,9	63,3	63,2	61,3
	2k	66,0	62,1	57,3	57,5	55,5	53,6
	4k	76,0	71,9	69,1	68,5	67,4	65,7
	8k	72,2	70,1	69,7	70,1	68,6	68,0
Índices	**S**	111,8	108,2	106,5	106,7	106,1	104,4
	L	87,1	84,1	82,3	82,4	81,8	80,5
	M	89,0	89,8	87,2	85,0	90,0	83,3
	m	60,7	67,0	62,5	64,3	60,9	62,7
	L01	88,0	85,0	84,0	84,0	86,0	82,0
	L10	87,0	85,0	83,0	83,0	82,0	81,0
	L50	87,0	84,0	82,0	82,0	81,0	80,0
	L90	80,0	83,0	81,0	81,0	80,0	79,0

Tabela B.3 – Dados do monitoramento da barreira acústica simples

Monitoramento com barreira simples - 21/12/2007						
Posição	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**
Início	13h 38min	13h 48min	13h 57min	14h 05min	14h 12min	14h 20min
Fim	13h 43min	13h 52min	14h 01min	14h 09min	14h 16min	14h 24min
A [dB(A)]	82,2	66,6	66,6	68,1	68,1	68,2
C [dB(C)]	90,0	77,8	78,5	79,5	79,5	78,8
Lin [dB]	90,1	78,5	78,8	79,8	80,1	79,9
Nível de Pressão Sonora - NPS [dB]						
Freqüência [Hz]						
31,5	62,1	62,5	62,5	61,2	60,1	61,0
63	65,8	66,6	66,2	68,3	63,2	63,4
125	85,3	73,9	75,3	76,4	75,3	75,0
250	87,0	74,7	75,4	76,9	77,2	77,0
500	77,4	61,6	62,3	61,7	62,2	64,8
1k	71,6	50,9	50,7	49,2	46,9	46,9
2k	67,7	45,8	45,8	48,0	46,2	45,8
4k	76,5	42,6	46,5	49,5	46,0	46,3
8k	73,3	41,7	42,1	43,9	45,6	44,8
Índices						
S	115,1	103,4	103,2	104,4	105,1	105,1
L	90,0	78,1	78,6	79,7	80,0	79,5
M	93,1	83,1	84,7	84,5	84,6	84,4
m	59,0	67,1	63,4	63,7	63,1	61,1
L01	92,0	81,0	90,0	82,0	82,0	82,0
L10	91,0	79,0	79,0	80,0	81,0	80,0
L50	89,0	77,0	78,0	79,0	80,0	79,0
L90	88,0	76,0	77,0	78,0	78,0	78,0

Tabela B.4 – Dados do monitoramento da barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte

Monitoramento barreira com ressoadores voltados para a fonte - 21/12/2007							
Posição		**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**
Início		11h 18min	11h 33min	11h 49min	11h 57min	12h 17min	12h 24min
Fim		11h 22min	11h 37min	11h 53min	12h 01min	12h 21min	12h 28min
A [dB(A)]		81,7	65,3	66,2	67,4	67,5	68,1
C [dB(C)]		89,5	76,8	78,0	79,2	79,3	79,1
Lin [dB]		90,2	77,3	79,8	80,1	79,5	79,7
Nível de Pressão Sonora - NPS [dB]							
Freqüência [Hz]	**31,5**	59,5	59,2	58,1	63,6	58,5	60,7
	63	65,0	63,0	66,3	62,5	61,5	64,0
	125	86,0	72,5	74,5	75,9	74,9	75,3
	250	85,5	74,4	73,6	75,3	76,6	75,9
	500	77,7	58,2	60,9	61,4	60,8	62,7
	1k	70,5	48,0	50,5	46,3	46,8	48,2
	2k	67,3	45,6	44,1	47,4	45,1	44,8
	4k	76,4	44,2	44,6	47,1	49,0	47,3
	8k	73,4	41,3	42,1	44,8	47,5	46,9
Índices	**S**	113,1	101,0	102,2	104,2	104,3	103,6
	L	90,2	77,5	78,2	80,0	79,8	79,7
	M	93,7	83,9	86,8	88,7	83,7	82,6
	m	64,4	65,4	59,7	60,5	61,1	64,3
	L01	92,0	80,0	83,0	84,0	81,0	81,0
	L10	91,0	78,0	79,0	81,0	80,0	80,0
	L50	90,0	77,0	77,0	79,0	79,0	79,0
	L90	88,0	76,0	76,0	78,0	78,0	78,0

Tabela B.5 – Dados do monitoramento da barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores

Monitoramento barreira com ressoadores voltados para os receptores - 21/12/2007						
Posição	**P1**	**P2**	**P3**	**P4**	**P5**	**P6**
Início	12h 38min	12h 47min	12h 55min	13h 02min	13h 11min	13h 20min
Fim	12h 42min	12h 51min	12h 59min	13h 06min	13h 15min	13h 25min
A [dB(A)]	83,0	67,3	65,7	66,9	68,2	68,1
C [dB(C)]	90,2	78,1	77,8	78,3	79,6	79,1
Lin [dB]	90,7	78,6	81,3	78,7	79,9	80,3
Nível de Pressão Sonora - NPS [dB]						
Freqüência [Hz]						
31,5	64,6	61,0	63,7	57,7	61,8	63,2
63	65,7	63,9	63,8	62,7	64,5	62,5
125	85,6	73,6	74,0	75,2	75,3	75,4
250	87,0	75,7	74,1	74,8	76,8	76,8
500	78,0	61,8	59,7	59,6	63,0	62,2
1k	71,6	50,4	51,3	50,3	49,4	47,8
2k	68,3	45,1	45,6	46,8	45,8	45,3
4k	77,6	46,0	47,0	47,9	46,4	46,6
8k	74,1	41,2	43,3	43,9	45,3	44,7
Índices						
S	115,1	101,9	103,8	103,4	104,7	104,8
L	90,5	77,7	79,8	79,3	79,6	79,4
M	93,7	83,5	88,4	82,9	85,2	87,3
m	64,1	62,6	61,3	60,4	62,3	63,1
L01	92,0	80,0	85,0	81,0	82,0	83,0
L10	91,0	79,0	81,0	80,0	80,0	80,0
L50	90,0	77,0	79,0	79,0	79,0	79,0
L90	89,0	76,0	77,0	77,0	78,0	77,0

Nas Tabelas B.6 encontram-se os dados fornecidos pelo programa TrueRTA® e, na Tabela B7 estes mesmos dados calibrados. Quando se lê "calçada" entenda-se o ponto P1, equivalente ao ponto de monitoramento na calçada, a um metro do meio, fio durante a caracterização do ruído próximo à Avenida Colombo. No modelo, este ponto está a 0,96m (noventa e seis centímetros) da barreira acústica na face voltada para a fonte sonora.

Tabela B.6 – Dados do monitoramento das barreiras acústicas em escala

Valores TrueRTA - 21/12/2007									
Freqüência [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Sem barreira acústica									
NPS [dB] calçada	56,6	58,3	65,4	72,9	66,8	61,1	59,4	72,1	64,5
NPS [dB] 0,20m	52,1	58,6	65,9	73,0	66,8	60,7	57,9	70,7	63,6
NPS [dB] 0,60m	51,9	58,5	65,5	72,9	66,6	60,5	57,7	70,4	63,4
NPS [dB] 1,20m	52,4	59,0	65,7	73,3	67,1	60,9	57,9	70,7	63,5
NPS [dB] 1,80m	52,5	60,9	65,8	72,8	66,8	60,5	58,0	70,7	63,7
NPS [dB] 2,40m	52,5	59,0	65,3	72,9	66,6	60,5	57,7	70,3	63,6
Barreira acústica simples									
NPS [dB] calçada	52,9	57,3	64,7	67,5	67,4	61,6	59,6	70,1	63,9
NPS [dB] 0,20m	53,5	57,1	65,0	68,2	68,0	62,6	59,3	70,1	63,3
NPS [dB] 0,60m	54,2	62,0	64,7	67,7	67,6	61,9	58,8	69,8	63,4
NPS [dB] 1,20m	51,9	58,3	64,6	67,7	67,5	61,8	58,8	70,2	64,0
NPS [dB] 1,80m	52,0	57,5	64,6	67,7	67,5	61,6	58,7	70,0	64,1
NPS [dB] 2,40m	51,8	57,0	64,6	67,9	67,6	61,9	58,8	70,2	63,7
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora									
NPS [dB] calçada	54,9	60,4	64,8	67,4	66,9	61,5	58,0	69,1	62,3
NPS [dB] 0,20m	54,5	60,8	64,7	67,3	66,9	61,5	57,8	70,1	62,3
NPS [dB] 0,60m	52,4	60,0	64,8	67,6	67,3	61,8	58,0	69,9	62,4
NPS [dB] 1,20m	54,5	59,3	65,4	67,7	67,5	61,9	58,2	69,9	62,9
NPS [dB] 1,80m	53,0	60,0	64,8	67,6	67,2	61,7	58,1	69,9	62,8
NPS [dB] 2,40m	53,5	60,8	64,7	67,4	66,9	61,2	57,8	69,9	62,7
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores									
NPS [dB] calçada	54,3	61,1	63,5	68,3	66,1	62,4	58,4	70,2	63,9
NPS [dB] 0,20m	54,2	60,3	63,1	68,3	65,7	61,2	58,3	70,0	64,5
NPS [dB] 0,60m	58,9	61,5	63,5	68,7	66,1	61,9	58,3	69,8	63,6
NPS [dB] 1,20m	53,6	60,2	63,6	68,9	66,3	62,2	58,7	70,5	63,4
NPS [dB] 1,80m	52,4	58,3	63,5	69,1	66,8	62,3	59,2	70,6	64,7
NPS [dB] 2,40m	53,5	58,3	63,3	69,0	66,5	62,0	59,0	70,6	64,9

Tabela B.7 – Dados calibrados do monitoramento das barreiras acústicas em escala

Valores TrueRTA calibrados									
Freqüência [Hz]	31,5	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
Sem barreira acústica									
NPS [dB] calçada	62,8	66,0	80,7	84,0	77,3	68,6	66,0	76,0	72,2
NPS [dB] 0,20m	58,3	66,3	81,2	84,1	77,3	68,2	64,5	74,6	71,3
NPS [dB] 0,60m	58,1	66,1	80,8	84,0	77,1	68,0	64,4	74,3	71,1
NPS [dB] 1,20m	58,6	66,7	81,0	84,4	77,5	68,4	64,5	74,6	71,3
NPS [dB] 1,80m	58,7	68,6	81,1	83,9	77,3	68,0	64,6	74,6	71,4
NPS [dB] 2,40m	58,7	66,7	80,6	84,0	77,1	67,9	64,4	74,2	71,3
Barreira acústica simples									
NPS [dB] calçada	62,1	65,8	85,3	87,0	77,4	71,6	67,7	76,5	73,3
NPS [dB] 0,20m	62,7	65,5	85,6	87,6	78,1	72,6	67,3	76,5	72,7
NPS [dB] 0,60m	63,4	70,4	85,3	87,1	77,6	71,9	66,8	76,3	72,7
NPS [dB] 1,20m	61,1	66,7	85,2	87,1	77,6	71,7	66,9	76,6	73,4
NPS [dB] 1,80m	61,2	65,9	85,2	87,1	77,5	71,6	66,8	76,5	73,4
NPS [dB] 2,40m	61,0	65,4	85,2	87,4	77,6	71,9	66,9	76,6	73,1
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para a fonte sonora									
NPS [dB] calçada	59,5	65,0	86,0	85,5	77,7	70,5	67,3	76,4	73,4
NPS [dB] 0,20m	59,1	65,4	85,9	85,3	77,7	70,4	67,1	77,5	73,3
NPS [dB] 0,60m	57,0	64,5	86,0	85,7	78,1	70,8	67,4	77,2	73,4
NPS [dB] 1,20m	59,1	63,9	86,6	85,8	78,3	70,9	67,6	77,3	74,0
NPS [dB] 1,80m	57,5	64,5	85,9	85,7	78,0	70,6	67,5	77,2	73,8
NPS [dB] 2,40m	58,1	65,4	85,9	85,5	77,7	70,2	67,1	77,2	73,8
Barreira acústica de ressoadores de Helmholtz voltados para os receptores									
NPS [dB] calçada	64,6	65,7	85,6	87,0	78,0	71,6	68,3	77,6	74,1
NPS [dB] 0,20m	64,5	64,9	85,2	87,0	77,6	70,4	68,2	77,3	74,7
NPS [dB] 0,60m	69,2	66,1	85,6	87,4	78,0	71,1	68,3	77,2	73,9
NPS [dB] 1,20m	63,9	64,8	85,6	87,6	78,2	71,4	68,6	77,9	73,6
NPS [dB] 1,80m	62,7	62,9	85,6	87,7	78,7	71,5	69,1	78,0	75,0
NPS [dB] 2,40m	63,9	62,9	85,4	87,7	78,4	71,2	68,9	77,9	75,2

Livros Grátis

(http://www.livrosgratis.com.br)

Milhares de Livros para Download:

Baixar livros de Administração
Baixar livros de Agronomia
Baixar livros de Arquitetura
Baixar livros de Artes
Baixar livros de Astronomia
Baixar livros de Biologia Geral
Baixar livros de Ciência da Computação
Baixar livros de Ciência da Informação
Baixar livros de Ciência Política
Baixar livros de Ciências da Saúde
Baixar livros de Comunicação
Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE
Baixar livros de Defesa civil
Baixar livros de Direito
Baixar livros de Direitos humanos
Baixar livros de Economia
Baixar livros de Economia Doméstica
Baixar livros de Educação
Baixar livros de Educação - Trânsito
Baixar livros de Educação Física
Baixar livros de Engenharia Aeroespacial
Baixar livros de Farmácia
Baixar livros de Filosofia
Baixar livros de Física
Baixar livros de Geociências
Baixar livros de Geografia
Baixar livros de História
Baixar livros de Línguas

Baixar livros de Literatura
Baixar livros de Literatura de Cordel
Baixar livros de Literatura Infantil
Baixar livros de Matemática
Baixar livros de Medicina
Baixar livros de Medicina Veterinária
Baixar livros de Meio Ambiente
Baixar livros de Meteorologia
Baixar Monografias e TCC
Baixar livros Multidisciplinar
Baixar livros de Música
Baixar livros de Psicologia
Baixar livros de Química
Baixar livros de Saúde Coletiva
Baixar livros de Serviço Social
Baixar livros de Sociologia
Baixar livros de Teologia
Baixar livros de Trabalho
Baixar livros de Turismo