



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ERICK VAN CASSEB GUIMARAES**

**INFLUÊNCIA DO RUÍDO DE TRÁFEGO EM EDIFÍCIOS E**  
**PROPOSTA DE SOLUÇÃO DESENVOLVIDA COM AUXÍLIO DE**  
**MODELOS NUMÉRICOS**

Belém

2011

**ERICK VAN CASSEB GUIMARAES**

**INFLUÊNCIA DO RUÍDO DE TRÁFEGO EM EDIFÍCIOS E  
PROPOSTA DE SOLUÇÃO DESENVOLVIDA COM AUXÍLIO DE  
MODELOS NUMÉRICOS**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica. Orientador: Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo

Belém

2011

**Dados Internacionais de catalogação na publicação (CIP), Biblioteca do Mestrado em Engenharia Mecânica/ UFPA, Belém, PA.**

G963i Guimaraes, Erick Van Casseb

Influência do Ruído de Tráfego em Edifícios e Proposta de Solução Desenvolvido com Auxílio de Modelos Numéricos./ Erick Van Casseb Guimaraes; Orientador: Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo. – Belém, 2011.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2011.

1. Isolamento Acústico. 2. Tratamento Acústico. 3. Difração Sonora. 4. Ruído de Tráfego. I. Melo, Gustavo da Silva Vieira de, orientador. II. Título.

CDD 19.ed. 669.94

**ERICK VAN CASSEB GUIMARAES**

**INFLUÊNCIA DO RUÍDO DE TRÁFEGO EM EDIFÍCIOS E  
PROPOSTA DE SOLUÇÃO DESENVOLVIDA COM AUXÍLIO DE  
MODELOS NUMÉRICOS**

Dissertação apresentada para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica.

Data da aprovação: 27 de maio de 2011.

BANCA EXAMINADORA:

\_\_\_\_\_ – Orientador  
Prof. Dr. Gustavo da Silva Vieira de Melo/PPGEM/UFPA

\_\_\_\_\_ – Membro Interno  
Prof. Dr. Newton Sure Soeiro/PPGEM/UFPA

\_\_\_\_\_ – Membro Externo  
Prof. Dr. Aloísio Leoni Schmid/PPGD/UFPR

**À Anne Berger,  
À Audrey Casseb,  
À Dana Van Berger,  
À Erica Van Berger,  
À Mirna Van Berger.**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus por ter me dado a vida e por sempre me proteger.

A minha família que sempre me apoiou em meus projetos.

Ao Professor Gustavo Melo pelos ensinamentos.

Ao Professor Newton Soeiro pelos ensinamentos.

Ao Professor Alexandre Mesquita pelos ensinamentos.

Aos Colaboradores Adry Kleber, Alysson Kleber, André Santana e Gabriel Ohana.

A Empresa Porte Engenharia pelo espaço cedido do Edifício Lille (EP25).

Ao Engenheiro Renato Ribeiro (Porte Engenharia).

A Empresa Vanberger Engenharia pelas contribuições.

A Universidade Federal do Pará (UFPA).

Ao Grupo de Vibrações e Acústica (GVA) da UFPA.

A todos os meus amigos do GVA.

**“O meu passado é tudo quanto não consegui ser.  
Nem as sensações de momentos idos me são saudosas  
o que se sente exige o momento  
passado este, há um virar de página e a história continua,  
mas não o texto.”  
Fernando Pessoa**

## RESUMO

No Brasil, é grande o número de casas e apartamentos que sofrem a influência da poluição sonora. Atualmente, esta questão ganhou importante destaque no cenário local, uma vez que Belém-PA foi eleita a “Capital Nacional do Ruído” por vários anos, segundo dados obtidos pelo IBGE. Dentre os tipos mais comuns de poluição sonora, percebe-se que há uma maior queixa por parte da sociedade em relação ao ruído de tráfego, o qual é inerente ao cotidiano de qualquer grande cidade. À medida que os problemas de ruído de tráfego aumentam, cresce a preocupação com o grau de incômodo gerado na população, justificando o desenvolvimento de meios para quantificar e reduzir tal desconforto, além da busca por uma regulamentação desta situação, através de normas brasileiras. Portanto, a condição do ruído de tráfego, enquanto principal agente de incômodo da população, no que se refere à poluição sonora, vem justificar a necessidade de realização de um estudo que vise o desenvolvimento de elementos de edificações, de novas geometrias e de composição de materiais existentes, tais que se minimize a penetração do ruído de tráfego aos ambientes internos dessas edificações. Assim, este trabalho apresenta os resultados de estudos do comportamento acústico em edificações situadas frontalmente às vias de grande fluxo de veículos e que sofrem interferências ocasionadas pelo ruído de tráfego gerado em excesso, por essas fontes veiculares. Para tanto, foram realizadas medições em campo numa edificação de 25 andares, em fase avançada de construção e escolhida como piloto para o presente estudo, o qual apresenta uma modelagem numérica da edificação modelo, com o auxílio do *software* ODEON.

**Palavras-Chave:** Isolamento Acústico. Tratamento Acústico. Difração Sonora. Ruído de Tráfego.

## ABSTRACT

In Brazil, the number of houses and apartments that suffer the influence of noise pollution is quite large. Currently, this question gained important local attention when Belém-PA was elected the “National Capital of Noise” for several years in a row, according to data obtained by the IBGE. Among the most common types of noise pollution, the biggest complaint of society is regarding traffic noise, which is inherent to the daily life of any great city. While the traffic noise concerns increase, so does the preoccupation with a degree of discomfort from the population, justifying the development of means to quantify and reduce such discomfort beyond the means of regulations for this situation by Brazilian standards. Therefore, the condition of traffic noise, while a principal agent of annoyance for the population in which it refers to the noise pollution, it comes to justify the necessity to realize a study that aims at the development of elements of construction by means of new geometrics and composition of existing materials that minimize the penetration of traffic noise to the internal environments of these constructions. So, this work presents the results of studies of the acoustic behavior in situated constructions next to roads of great flow of vehicles which suffer interferences caused by the generation of traffic noise. So far, there were measures carried out in the field of a 25 story building in advanced stages of construction and was chosen as the subject for this study, which represents a numerical modeling of this building with the help of the software ODEON.

**Keywords:** Sound Insulation. AcousticTreatment. Sound Diffraction. Traffic Noise.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Verticalização de edificações na cidade de Belém	25
Figura 1.2 – Mapa do Brasil mostrando a cidade de Belém	26
Figura 1.3 – Imagem de Satélite da RMB	27
Figura 1.4 – Fluxo intenso de veículos em horário de pico	29
Figura 3.1 – Diferença entre o limiar de audibilidade e o limiar da dor, e relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora produzido por algumas fontes de ruído	39
Figura 3.2 – Medição de <i>PT</i> usando duas Câmaras Reverberantes	42
Figura 3.3 – O fenômeno da reflexão sonora	47
Figura 3.4 – Efeito de aumento da temperatura com a altura	50
Figura 3.5 – Efeito da diminuição da temperatura com a altura	51
Figura 3.6 – Variação do caminho das ondas acústicas sob efeito do vento	51
Figura 3.7 – Barreira destacando a atenuação por difração e a zona de sombra acústica	54
Figura 3.8 – Barreira de comprimento finito.	56
Figura 4.1 – EP25 em fase avançada de construção.	59
Figura 4.2 – Conjunto medidor de <i>NPS</i> classe 1.	60
Figura 4.3 – Desenho esquemático do ponto das medições na calçada.	61
Figura 4.4 – Imagem de um dos momentos das medições.	61
Figura 4.5 – Medição no primeiro período em bandas de oitava.	63
Figura 4.6 – Medição no segundo período, em bandas de oitava.	64
Figura 4.7 – Contagem de veículos no primeiro período.	65
Figura 4.8 – Contagem de veículos no segundo período.	66
Figura 4.9 – Conjunto medidor de <i>NPS</i> classe 2.	68

Figura 4.10 – Desenho dos pontos das medições nas sacadas.	69
Figura 4.11 - Imagem de um dos momentos das medições.	69
Figura 4.12 – Resultados de medição no primeiro período.	70
Figura 4.13 – Resultados de medição no segundo período.	72
Figura 4.14 – Resultados de medição no primeiro período.	73
Figura 4.15 – Resultados de medição no segundo período.	75
Figura 4.16 – Resultados de medição no primeiro período.	76
Figura 4.17 – Resultados de medição no segundo período.	78
Figura 4.18 – Gráfico de atenuação em função da elevação do EP25.	80
Figura 4.19 – Curva de tendência para o ponto P1 do 3º ao 21º andar.	81
Figura 4.20 – Curva de tendência para o ponto P2 do 3º ao 21º andar.	81
Figura 4.21 – Curva de tendência para o ponto P3 do 3º ao 21º andar.	82
Figura 4.22 – Curva de tendência para o ponto P4 do 3º ao 21º andar.	82
Figura 4.23 – Curva de tendência para o ponto P5 do 3º ao 21º andar.	83
Figura 5.1 – Desenho do conjunto de mini câmaras geminadas.	86
Figura 5.2 – Fonte sonora instalada na mini câmara emissora.	87
Figura 5.3 – Mini câmaras geminadas com partição inserida entre elas.	88
Figura 5.4 - Conjunto Analisador de sinais de quatro canais Brüel & Kjaer, tipo 3560C – <i>Pulse</i> , Amplificador de Potência e <i>Notebook</i> .	89
Figura 5.5 - Microfone de campo difuso, Brüel & Kjaer, tipo 4942.	89
Figura 5.6 – Partição de vidro triplo entre as câmaras geminadas.	91
Figura 5.7 – Partição de vidros triplos em detalhes.	92
Figura 5.8 – Representação dos pontos de medição nas mini câmaras.	94
Figura 5.9 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.2.	96
Figura 5.10 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.3.	98

Figura 5.11 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.4.	100
Figura 5.12 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.5.	102
Figura 5.13 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.6.	104
Figura 5.14 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.7.	106
Figura 5.15 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.8.	108
Figura 5.16 – Gráfico de <i>PT</i> das partições 1, 2 e 3.	110
Figura 5.17 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.10.	111
Figura 5.18 – Vedação do conjunto com borrachas laterais.	113
Figura 5.19 – Mini câmara reverberante com protótipo.	115
Figura 5.20 – Pontos de medição no interior da mini câmara.	116
Figura 5.21 – Tela metálica micro perfurada de acabamento do protótipo.	118
Figura 5.22 – Tecido ortofônico, aplicado em uma das faces do protótipo.	118
Figura 5.23 – Lã de rocha com 32 kg/m <sup>3</sup> e 100 mm de espessura.	119
Figura 5.24 – Suporte lateral em MDF 15 mm.	119
Figura 5.25 – Modelo de absorvedor acústico finalizado.	119
Figura 5.26 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.13.	121
Figura 5.27 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.14.	122
Figura 5.28 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.15.	123
Figura 5.29 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.16.	124
Figura 6.1 – Desenho em 3D do EP25.	126
Figura 6.2 – EP25 modelado no <i>ODEON</i> onde a linha vermelha representa a fonte sonora e os pontos azuis os receptores virtuais.	128
Figura 6.3 – EP25 e vizinhança, modelados no <i>ODEON</i> .	129
Figura 6.4 – Biblioteca de materiais do <i>ODEON</i> .	130
Figura 6.5 – Imagem parcial do EP25 em 3D.	130

Figura 6.6 – EP25 com microfones virtuais.	131
Figura 6.7 – Desenho esquemático da fonte em linha.	132
Figura 6.8 – Janela do Software com valor de NWS, espalhamento e coordenadas da fonte.	134
Figura 6.9 – Primeira simulação.	136
Figura 6.10 – Resultados da tabela 6.2.	137
Figura 6.11 – Segunda simulação.	139
Figura 6.12 – Resultados da tabela 6.4.	140
Figura 6.13 – Configuração em dez milhões de raios.	141
Figura 6.14 – Desenho esquemático mostrando a distância da fonte ao receptor no 3º andar.	142
Figura 6.15 – Janela do software, com novo preenchimento.	144
Figura 6.16 – Terceira simulação.	146
Figura 6.17 – Resultados da tabela 6.7.	147
Figura 6.18 – Protótipo absorvedor em módulo dupla face.	150
Figura 6.19 – Vista frontal parcial do EP25 modelado no ODEON.	151
Figura 6.20 – Gráfico da primeira simulação com partições e protótipo.	152
Figura 6.21 – EP25 com peitoril rebaixado.	153
Figura 6.22 – Gráfico da segunda simulação com partições e protótipo.	154
Figura 6.23 – Gráfico da terceira simulação com partições e protótipo.	156
Figura 6.24 – Aumento da atenuação com o aumento da área da sacada.	157

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Crescimento populacional da RMB desde 1950	28
Tabela 3.1 – Coeficientes de absorção sonora de materiais comuns em edificações	44
Tabela 3.2 – Valores de $\alpha_v$ por grupo de vegetação alta e densa	52
Tabela 4.1 – <i>NPS</i> medido na calçada no primeiro período	62
Tabela 4.2 – <i>NPS</i> medido na calçada no segundo período	63
Tabela 4.3 – Quantidade de veículos no primeiro período	64
Tabela 4.4 – Quantidade de veículos no segundo período	65
Tabela 4.5 – <i>NPS</i> (dB) na sacada do 3º andar no primeiro período	70
Tabela 4.6 – $L_{Aeq}$ (dBA) 3º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5	71
Tabela 4.7 – <i>NPS</i> (dB) na sacada do 3º andar no segundo período	71
Tabela 4.8 – $L_{Aeq}$ (dBA) 3º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5	72
Tabela 4.9 – <i>NPS</i> (dB) na sacada do 13º andar no primeiro período	73
Tabela 4.10 – $L_{Aeq}$ (dBA) 13º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5	74
Tabela 4.11 – <i>NPS</i> (dB) na sacada do 13º andar no segundo período	74
Tabela 4.12 – $L_{Aeq}$ (dBA) 13º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5	75
Tabela 4.13 – <i>NPS</i> (dB) na sacada do 21º andar no primeiro período	76
Tabela 4.14 – $L_{Aeq}$ (dBA) 21º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5	77
Tabela 4.15 – <i>NPS</i> (dB) na sacada do 21º andar no segundo período	77
Tabela 4.16 – $L_{Aeq}$ (dBA) 21º andar, pontos P1, P2, P3, P4 e P5	78
Tabela 4.17 – Valores de $L_{Aeq}$ para o 3º, 13º e 21º andares do EP25	80
Tabela 5.1 – Coordenadas dos pontos de medição e localização dos microfones	93
Tabela 5.2 – Resultado das medições de ruído de fundo com vidros duplos	95

Tabela 5.3 – Resultado das medições de ruído de fundo com vidros triplos	97
Tabela 5.4 – Medição de diferença de <i>NPS</i> nas câmaras geminadas, com vidros duplos 4-9-4	99
Tabela 5.5 – Medição de diferença de <i>NPS</i> nas câmaras geminadas, com vidros duplos 6-9-6	101
Tabela 5.6 – Medição de diferença de <i>NPS</i> nas câmaras geminadas, com vidros triplos 6,4-9-6	103
Tabela 5.7 – Compilação de diferenças de <i>NPS</i> , partições 1, 2 e 3, respectivamente	105
Tabela 5.8 – Medições de tempo de reverberação da câmara receptora	107
Tabela 5.9 – Perda de Transmissão das Partições 1, 2 e 3	109
Tabela 5.10 – Diferença de <i>TR</i> nas mini câmaras receptoras	111
Tabela 5.11 – Primeiras frequências naturais das mini câmaras geminadas	112
Tabela 5.12 – Coordenadas dos pontos de medição	116
Tabela 5.13 – <i>TR</i> da mini câmara reverberante sem amostra	120
Tabela 5.14 – <i>TR</i> da mini câmara reverberante com amostra	121
Tabela 5.15 – Comparativo de <i>TR</i> com e sem amostra	122
Tabela 5.16 - Coeficientes de absorção acústica do protótipo	123
Tabela 6.1 – Resultados da 1ª simulação	135
Tabela 6.2 – Comparação entre a primeira simulação e a medição experimental	136
Tabela 6.3 – Resultados da 2ª simulação	138
Tabela 6.4 – Comparação entre a segunda simulação e a medição experimental	139
Tabela 6.5 – Resultados de medições de $L_{A10freq}$ no 3º andar do EP25	143

Tabela 6.6 – Resultados da 3ª simulação	145
Tabela 6.7 – Comparação entre a 3ª simulação e a medição experimental	146
Tabela 6.8 – Resultados da primeira simulação com peitoril vazado	152
Tabela 6.9 – Resultados da segunda simulação com peitoril rebaixado.	154
Tabela 6.10 – Resultados da terceira simulação com peitoril normalizado.	155

## ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMP	Amplificação
AT	Perda por Inserção
$AT_d$	Atenuação por Difração
$AT_t$	Atenuação por Transmissão
CAD	Computer Aided Design
CTBEL	Companhia de Transportes do Município de Belém
D	Diferença de nível de pressão acústica
dB	Decibel
dBA	Decibel ponderado na curva A
DETRAN-PA	Departamento de Trânsito do Estado do Pará
DI	Índice de Diretividade
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EEA	<i>The European Environment Agency</i>
EP25	Edifício da Porte com 25 Andares
Fig.	Figura
GVA	Grupo de Vibrações e Acústica
Hz	Hertz
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de Desenvolvimento Humano
ISO	International Standard Organization
$L_{A10}$	Nível equivalente ponderado na escala A equivalente a 10% do tempo de medição

L <sub>A90</sub>	Nível equivalente ponderado na escala A equivalente a 90% do tempo de medição
L <sub>Aeq</sub>	Nível equivalente ponderado na curva A
LVA	Laboratório de Vibrações e Acústica
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> - Fibra de Média Densidade
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NC	Curvas de avaliação do ruído
NI	Nível de intensidade
NPS	Nível de pressão sonora
NWS	Nível de potência sonora
OMS	Organização Mundial da Saúde
P1	Ponto de medição 1
P2	Ponto de medição 2
P3	Ponto de medição 3
P4	Ponto de medição 4
P5	Ponto de medição 5
PA	Pará
PT	Perda de Transmissão
Q	Fator de Diretividade
RMB	Região Metropolitana de Belém
RMS	<i>Root Mean Square</i>
Tab.	Tabela
TNI	<i>Traffic Noise Index</i>
TR	Tempo de Reverberação
UFPA	Universidade Federal do Pará

UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UV	Ultra Violeta

### Letras Latinas

A	Área de absorção sonora equivalente
c	Velocidade do som no ar
°C	Grau Centígrado
d	Distância
<i>DI</i>	Índice de Diretividade
<i>f<sub>n</sub></i>	Frequência atural
h	Altura
<i>I<sub>r</sub></i>	Intensidade sonora
kg	Quilograma
L	Comprimento
<i>L<sub>x</sub>, L<sub>y</sub> e L<sub>z</sub></i>	Dimensões de uma sala retangular
m	Metro
N	Número de Fresnel
<i>n<sub>x</sub>, n<sub>y</sub> e n<sub>z</sub></i>	Números inteiros positivos
P	Pressão
<i>P<sub>eficaz,r</sub></i>	Valor eficaz da pressão sonora à distância <i>r</i>
Pa	Pascal
<i>P(t)</i>	Pressão acústica instantânea
<i>P<sub>0</sub></i>	Pressão acústica de referência
Q	Fator de diretividade

$r$	Distância
$S$	Área da superfície
$T$	Tempo de integração
$u$	Umidade relativa
$V$	Volume
$w_{via}$	Largura da via
$W$	Potência sonora
$W_1$	Energia sonora incidente
$W_2$	Energia sonora transmitida
$x$	Coefficiente de absorção por unidade de volume

### Letras Gregas

$\alpha_i$	Coefficiente de absorção sonora do elemento construtivo
$\rho c$	Impedância característica do meio de propagação
$r$	Coefficiente de reflexão
$\tau$	Coefficiente de transmissão
$\Omega$	ângulo sólido
$w_{via}$	Largura da via de tráfego
$\lambda$	Comprimento de onda

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	25
1.1.1	<b>O Transporte Urbano em Belém</b>	28
1.2	JUSTIFICATIVA	29
1.3	OBJETIVOS	30
1.3.1	<b>Objetivo Geral</b>	30
1.3.2	<b>Objetivos Específicos</b>	30
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	31

### CAPÍTULO 2

2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
2.1.1	<b>O Ruído de Tráfego nos Centros Urbanos</b>	32
2.1.2	<b>Contenção do Ruído de Tráfego Através de Elementos Externos de Edificações</b>	35
2.1.3	<b>Principais Normas Utilizadas</b>	36

### CAPÍTULO 3

3.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	38
3.1.1	<b>O Conceito de Som e Ruído</b>	38
3.1.2	<b>O Limiar de Audibilidade</b>	38
3.1.3	<b>A Intensidade Sonora</b>	39
3.1.4	<b>A Potência Sonora</b>	40
3.1.5	<b>Relação entre as Grandezas Intensidade, Potência e Pressão Sonora</b>	40
3.1.6	<b>Os Níveis de Potência, Intensidade e Pressão Sonora</b>	41
3.1.7	<b>A Diferença de Nível (<i>D</i>)</b>	41

<b>3.1.8</b>	<b>Medição da Perda de Transmissão Sonora com duas Câmaras Reverberantes</b>	<b>42</b>
<b>3.1.9</b>	<b>O Nível Equivalente <math>L_{Aeq}</math></b>	<b>43</b>
<b>3.1.10</b>	<b>O Coeficiente de Absorção Sonora <math>\alpha</math></b>	<b>43</b>
<b>3.1.11</b>	<b>Determinação do <math>\alpha</math> em Câmara Reverberante</b>	<b>44</b>
<b>3.1.12</b>	<b>O Tempo de Reverberação de um Ambiente</b>	<b>45</b>
<b>3.1.13</b>	<b>A Reflexão Sonora</b>	<b>46</b>
<b>3.1.14</b>	<b>A Equação Básica da Propagação Sonora ao Ar Livre</b>	<b>47</b>
<b>3.1.15</b>	<b>Modos Acústicos</b>	<b>48</b>
<b>3.2</b>	<b>O RUÍDO DE TRÁFEGO EM EDIFICAÇÕES</b>	<b>48</b>
<b>3.2.1</b>	<b>A Atenuação do Ruído com a Distância</b>	<b>49</b>
<b>3.2.2</b>	<b>A Absorção do Som ao Ar Livre</b>	<b>49</b>
<b>3.2.3</b>	<b>O Efeito das Condições Meteorológicas</b>	<b>50</b>
<b>3.2.4</b>	<b>O Efeito da Vegetação</b>	<b>51</b>
<b>3.2.5</b>	<b>Amplificação Sonora Causada Pela Reverberação nas Fachadas de Edificações</b>	<b>53</b>
<b>3.2.6</b>	<b>Barreiras Acústicas</b>	<b>54</b>
<b>3.3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>57</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>		
<b>4.1</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>58</b>
<b>4.1.1</b>	<b>Medições de Nível de Pressão Sonora em frente ao EP25</b>	<b>59</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Procedimentos de Medição</b>	<b>60</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Medições realizadas na calçada em frente ao EP25</b>	<b>62</b>
4.1.3.1	Níveis de Pressão Sonora	62
4.1.3.2	Contagem de Veículos Durante Cinquenta Minutos	64

4.1.3.3 Interpretação dos Resultados	66
<b>4.1.4 Medições de NPS nas Sacadas de Apartamentos do EP25</b>	<b>67</b>
<b>4.1.5 Procedimentos Metodológicos</b>	<b>68</b>
4.1.5.1 Níveis de Pressão Sonora	70
4.1.5.2 Interpretação dos Resultados	79
<b>4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>83</b>
CAPÍTULO 5	
5.1 ELEMENTOS PARA ISOLAÇÃO SONORA	84
<b>5.1.1 Construção das Câmaras Geminadas</b>	<b>85</b>
<b>5.1.2 Equipamentos de Medição e Aquisição de Dados</b>	<b>88</b>
<b>5.1.3 Ensaio de Perda de Transmissão em Partições de Vidro</b>	<b>90</b>
<b>5.1.4 Ensaio dos Níveis de Ruído de Fundo nas Câmaras Geminadas com Inserções das Partições 1 e 3</b>	<b>93</b>
<b>5.1.5 Ensaio de Diferenças de Níveis nas Câmaras Geminadas com a Inserção das Partições 1, 2 e 3</b>	<b>98</b>
<b>5.1.6 Ensaio do Tempo de Reverberação da Câmara Receptora com a Inserção das Partições 1, 2 e 3</b>	<b>106</b>
<b>5.1.7 Cálculo da Perda de Transmissão</b>	<b>108</b>
<b>5.1.8 Interpretação dos Resultados</b>	<b>110</b>
5.2 ENSAIOS EM ELEMENTOS PARA ABSORÇÃO SONORA	114
<b>5.2.1 A Mini Câmara Reverberante</b>	<b>114</b>
<b>5.2.2 Absorção Sonora de Elementos Desenvolvidos para Composição de Fachadas de Edificações</b>	<b>117</b>
<b>5.2.3 Materiais Utilizados na Confecção do Protótipo</b>	<b>117</b>
<b>5.2.4 Ensaio do Tempo de Reverberação Mini Câmara Reverberante</b>	<b>120</b>

<b>5.2.5 Interpretação dos Resultados</b>	<b>124</b>
<b>CAPÍTULO 6</b>	
<b>6.1 RESULTADOS NUMÉRICOS</b>	<b>125</b>
<b>6.1.1 Desenho do EP25 em CAD</b>	<b>125</b>
<b>6.1.2 Volume de Controle envolvendo o Modelo do EP25</b>	<b>127</b>
<b>6.1.3 Primeira Simulação</b>	<b>129</b>
<b>6.1.4 Segunda Simulação</b>	<b>137</b>
<b>6.1.5 Terceira Simulação</b>	<b>140</b>
<b>6.1.6 Interpretação dos Resultados</b>	<b>147</b>
<b>6.2 APLICAÇÕES DO PROTÓTIPO E PARTIÇÕES</b>	<b>150</b>
<b>6.2.1 Primeira Simulação com Utilização de Teto Absorvedor, Peitoril de Metal Grade Vazada e Partições de Vidro Triplo nas Portas e Janelas</b>	<b>151</b>
<b>6.2.2 Segunda Simulação com Utilização de Teto Absorvedor, Peitoris Rebaixados e Partições de Vidro Triplo nas Portas e Janelas</b>	<b>153</b>
<b>6.2.3 Terceira Simulação com Utilização de Teto Absorvedor e Partições de Vidro Triplo nos Peitoris, Portas e Janelas</b>	<b>155</b>
<b>6.2.4 Interpretação dos Resultados</b>	<b>156</b>
<b>CAPÍTULO 7</b>	
<b>7.1 Considerações Finais</b>	<b>158</b>
<b>7.2 Recomendações</b>	<b>159</b>
<b>7.3 Sugestões para Trabalhos Futuros</b>	<b>160</b>
<b>REFERÊNCIAS</b>	
<b>APÊNDICE I</b>	

## CAPÍTULO 1

### 1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Belém, capital do estado do Pará, com uma população de 1.437.600 habitantes, é a décima cidade mais populosa do Brasil e a segunda mais populosa da região Norte. A cidade possui o maior Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) entre as cidades da região Norte e, nos últimos anos, vem se verticalizando de forma acelerada pelo fato de haver poucas áreas horizontais não construídas em seus limites, levando, assim, investimentos para sua região metropolitana.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Belém tem o quinto metro quadrado mais caro do país. A Fig. 1.1 dá uma idéia do crescimento verticalizado da cidade.

Figura 1.1 – Verticalização de edificações na cidade de Belém



Fonte: Próprio autor

Na Fig. 1.2, a seguir, é mostrada a localização de Belém no mapa do Brasil.

Figura 1.2 – Mapa do Brasil mostrando a cidade de Belém



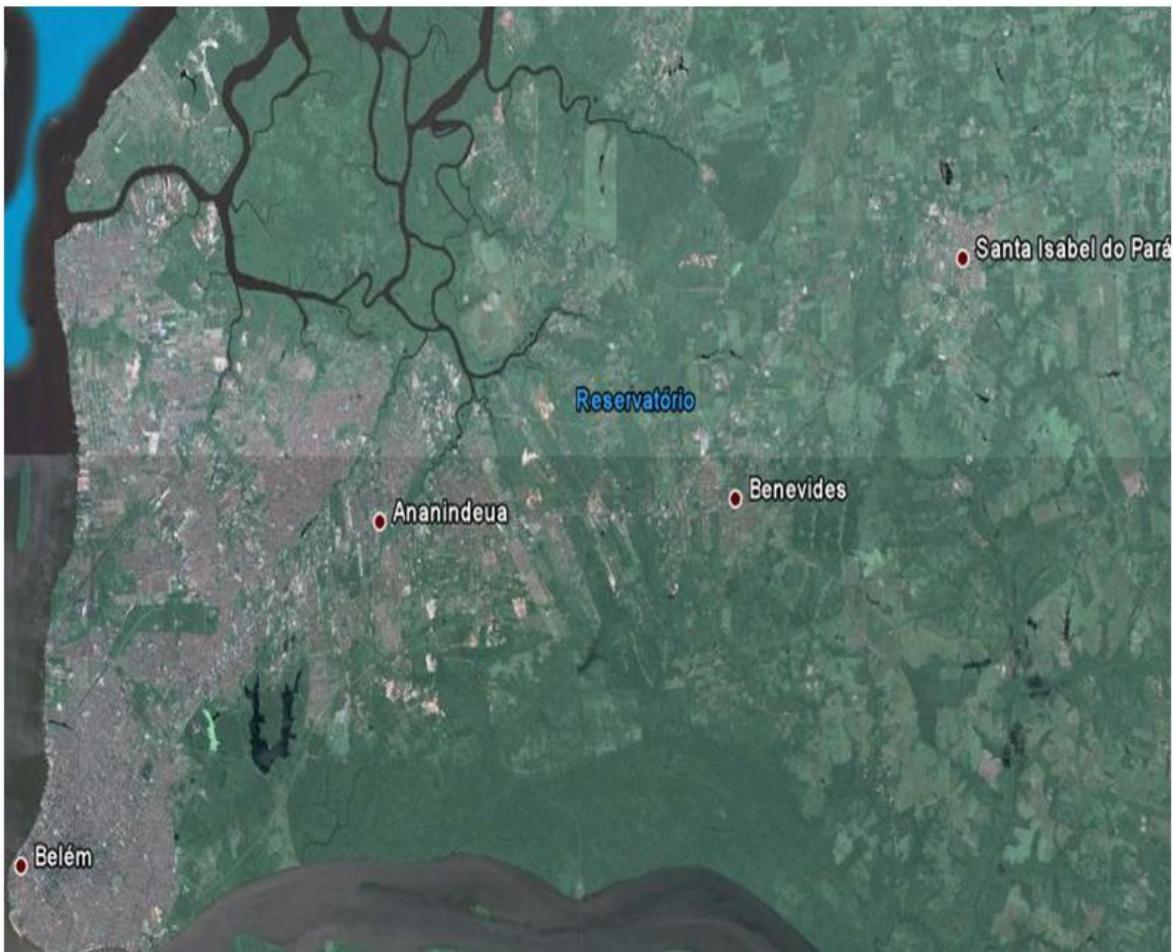
Fonte: [www.interpretacao.com](http://www.interpretacao.com)

Belém é conhecida como a "Metrópole da Amazônia" graças ao seu rápido desenvolvimento nos últimos anos. Para se ter uma ideia aproximada desse desenvolvimento, sua população cresceu em 10 vezes desde 1950 até 2010, enquanto a população de Manaus, outra metrópole da Região Norte, cresceu em aproximadamente 7 vezes no mesmo período, segundo dados do IBGE.

Assemelhando-se a uma península, cercada por água, áreas militares e de proteção ambiental, o município teve pouco espaço para expansão, ocasionando conurbação com municípios próximos, dando origem à Grande Belém ou Região Metropolitana de Belém (RMB), que tem população estimada em 2,5 milhões de habitantes.

A Fig. 1.3 mostra uma imagem de satélite da RMB.

Figura 1.3 – Imagem de Satélite da RMB



Fonte: Google Earth 2010

Criada por lei complementar federal em 1973 (alterada em 1995 e em 2010), a RMB, com 2.503.511 habitantes (IBGE, 2010), compreende os municípios de Ananindeua, Belém, Benevides, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Isabel do Pará. A RMB é a maior da região Norte e uma das cinco maiores regiões metropolitanas brasileiras.

A seguir, a Tab. 1.1 apresenta uma estimativa do crescimento populacional da RMB desde o ano de 1950, baseada em dados do IBGE.

Tabela 1.1 – Crescimento populacional da RMB desde 1950

Ano	População/Habitantes
1950	242.000
1955	303.000
1960	378.000
1965	477.000
1970	601.000
1975	726.000
1980	827.000
1985	966.000
1990	1.129.000
1995	1.393.000
2000	1.748.000
2010	2.503.000

Fonte: IBGE 2010

### 1.1.1 O Transporte Urbano em Belém

A capital paraense tem uma frota crescente de carros, sendo mais de 380 mil veículos circulando diariamente pela cidade. Para se ter uma ideia, entre 2008 e 2009 o número de automóveis nas ruas de Belém subiu 23%. Todo esse crescimento urbano tem um impacto imediato: engarrafamentos das vias e estresse de motoristas e pedestres, além de aumento vertiginoso do ruído de tráfego, principalmente em horários de maior fluxo (SOTER, 2010).

Segundo dados da Companhia de Transportes do Município de Belém (CTBEL), o sistema municipal e metropolitano de transporte por ônibus possui 137 linhas distribuídas em 42 metropolitanas e 95 do município de Belém, exploradas por 28 empresas, sendo 13 municipais e 15 metropolitanas. O serviço de transporte público é composto por uma frota operacional de 1.676 veículos que circulam na região metropolitana, destes 1.160 em Belém. Esta frota executa aproximadamente 13.697 viagens diárias e transporta 970.000 passageiros por dia. Ainda segundo a CTBEL, há uma frota oficial de transportes alternativos com 1.333 veículos entre vans e microônibus em atividade em Belém.

Dados recentes do Departamento de Trânsito do Estado do Pará (DETRAN-PA) indicam que a frota de veículos no estado ultrapassou 1.000.000 em março de 2011, sendo 400.000 veículos, só na RMB.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

No Brasil, é grande o número de casas e apartamentos que sofrem a influência da poluição sonora. Atualmente, esta questão ganhou importante destaque no cenário local, uma vez que Belém foi eleita a “Capital Nacional do Ruído” por vários anos.

Dentre os tipos mais comuns de poluição sonora, percebe-se que há uma maior queixa por parte da sociedade em relação ao ruído de tráfego, o qual é inerente ao cotidiano de qualquer grande cidade. A Fig. 1.4 mostra uma grande avenida de Belém em horário de pico no trânsito.

Figura 1.4 – Fluxo intenso de veículos em horário de pico



Fonte: Diário do Pará 2010

À medida que os problemas de ruído de tráfego aumentam nas grandes cidades do país cresce a preocupação com o grau de incômodo gerado na população, justificando o desenvolvimento de meios para quantificar e reduzir tal desconforto, além da busca por uma regulamentação desta situação, através de normas brasileiras.

Portanto, a condição do ruído de tráfego, enquanto principal agente de incômodo da população, no que se refere à poluição sonora, vem justificar a necessidade de realização de um estudo que vise o desenvolvimento de elementos de edificações, de novas geometrias e de composição de materiais existentes, tais que se minimize a penetração do ruído de tráfego aos ambientes internos dessas edificações.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal caracterizar a influência do ruído de tráfego em prédios verticais com mais de 10 andares, além de estudar a influência de materiais usados na construção dessas fachadas, propondo soluções, em composição com os materiais comumente utilizados, para minimização do ruído de tráfego nos interiores dessas edificações.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Medir o ruído de tráfego em ambientes externos de uma edificação modelo sujeita à interferência do mesmo;
- Aplicar produtos para a minimização do ruído de tráfego que penetra no interior dessas edificações;
- Desenvolver novos produtos com a utilização de materiais de boa isolamento e/ou absorção acústica, de tal forma que estes possam ser usados nas fachadas de edificações de acordo com a arquitetura pré-projetada;

- Validar o desempenho dos materiais desenvolvidos através de ensaios nas minicâmaras acústicas do Laboratório de Vibrações e Acústica (LVA) da Universidade Federal do Pará (UFPA);
- Modelar a fachada de um prédio modelo, com a utilização de *software* híbrido de raios acústicos e fontes virtuais.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em sete capítulos, a saber:

O capítulo 1 é de introdução ao tema, seguido de justificativa do tema de dissertação, objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2, apresenta-se uma revisão da literatura envolvendo o problema do ruído de tráfego.

No capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica envolvendo os principais fenômenos físicos e climáticos que interferem no ruído causado pelo tráfego de veículos.

O capítulo 4 aborda as medições de níveis de pressão sonora realizadas na calçada e nas sacadas de uma edificação modelo, com 25 andares em uma rua de grande fluxo de veículos na cidade de Belém.

No capítulo 5 são mostrados os ensaios dos materiais propostos para minimizar o ruído de tráfego que penetra no interior de edificações.

As simulações numéricas dos ambientes mapeados acusticamente são tratadas no capítulo 6, além de serem apresentadas soluções viáveis, tanto do ponto de vista estético, quanto econômico, para atenuação do problema do ruído em questão.

Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões do estudo desenvolvido e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### 2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, é apresentada uma revisão da literatura que dá sustentação a este trabalho.

#### 2.1.1 O Ruído de Tráfego nos Centros Urbanos

Para Sancho (1982), as barreiras acústicas urbanas mais comuns são as paredes ou fachadas das edificações. A fonte de ruído, os veículos, situa-se, portanto, entre duas barreiras paralelas.

À medida que reduzem notavelmente os níveis sonoros em sua parte posterior, as barreiras paralelas refletem o ruído para a calçada, criando um espaço semi-reverberante entre os prédios, principalmente quando a distância entre as fachadas, ou barreiras, é pequena. Essa situação torna mais lenta a redução dos níveis sonoros do tráfego, resultando no fenômeno conhecido como efeito canhão. Logo, as reflexões do som nas paredes originam um aumento dos níveis de ruído e, em ruas estreitas, os níveis de ruído podem se tornar até maiores que em ruas largas, mesmo que o fluxo de veículos seja menor nas vias estreitas.

Watts e Nelson (1993) examinaram a relação entre o ruído medido e a percepção subjetiva do ruído, considerando 2250 passagens de veículos e 20 pessoas ouvindo. Neste estudo, os autores constataram que os níveis sonoros medidos segundo a curva de ponderação A apresentam melhor relação com a percepção subjetiva do ruído do que se forem medidos segundo a curva de ponderação B ou C. Concluíram também que é maior a correlação entre os níveis medidos com os graus da percepção subjetiva do ruído, para situações nas quais os veículos operam sob condições aproximadamente constantes, do que quando em aceleração.

Leão (1994) afirma que a envolvente sonora do local escolhido para uma operação imobiliária pode apresentar situações diversas e que os estímulos sonoros podem ser considerados nefastos, neutros ou desagradáveis, dependendo da utilização que se prevê para a construção a edificar e das pessoas que a vão ocupar. Afirma também que os edifícios a serem projetados irão modificar a envolvente sonora próxima e que, se o nível de pressão sonora exterior é importante ou está em risco de passar a ser, em função, por exemplo, do aumento de tráfego, deverá prever-se um aumento de isolamento de fachadas.

O mesmo autor sugere ainda que a escolha de um terreno para a implantação de um edifício de habitação, ou no caso mais vasto para a definição de uma zona residencial, deve ter como condicionante a natureza da envolvente sonora. Sugere também que, no caso do ruído de tráfego rodoviário, a avaliação deve ter por base a análise dos tipos de veículos, velocidade de circulação, espectro do ruído, e quantidade de tráfego.

Öhrström (1995) observou os efeitos do ruído de tráfego em Gothenburg, Suécia, durante a noite e constatou que, para ruídos intermitentes, o nível instantâneo do ruído e o número de eventos ruidosos são bem mais relacionados com os distúrbios do sono do que somente o nível equivalente. Conclui que para proteger as pessoas de distúrbios no sono, o máximo nível de ruído não deveria exceder 45 dB(A), durante a noite.

Rott (1995) desenvolveu um mapeamento de ruído na cidade de Porto Alegre, para as 18 h, com uma base total de dados de 560 pontos de medição de ruído e de contagem de veículos. Através de uma enquete social, realizada junto à população em diferentes bairros da capital gaúcha, concluiu que 47% da população considerava que o ruído mais perturbador é produzido pelos ônibus, os quais correspondiam a menos de 1% da frota de veículos, revelando que possíveis melhorias realizadas no ruído produzido pelos ônibus trariam resultados significativos na redução da poluição sonora percebida pela população.

Segundo Coelho (1996), o ruído é um dos principais fatores de degradação da qualidade do ambiente urbano, e em vários países é reconhecido como um problema de saúde pública.

Sabe-se que a poluição sonora gerada no ambiente das cidades raramente afeta o sistema auditivo, mas recentes pesquisas mostram que a resposta humana envolve o sistema cardiovascular e o sistema neuroendócrino. Assim, Coelho (1996) afirma que os fatores de efeito do ruído no homem podem ser classificados em comportamentais, que avaliam a reação das pessoas ao ruído ambiente e a interferência deste nas suas diversas atividades de vida, bem como em fatores psicológicos e médicos, de mudanças crônicas ocasionadas potencialmente pelo ambiente.

Para Nunes (1999), sobre uma via de circulação, cada veículo emite um ruído variável em função da velocidade, das condições de pilotagem e da qualidade do veículo e do pavimento. A presença de cruzamentos e de semáforos pode modificar e complicar a situação, fazendo com que aumente o número de variáveis que contribuem para o ruído global, como a variação da rotação do motor, a impaciência do motorista, o som das buzinas, etc.

Segundo Gerges (2000), a energia gerada por fontes sonoras sofre atenuação ao se propagar ao ar livre. Os fatores causadores de atenuação são: distância percorrida, barreiras, absorção atmosférica, vegetação, variação de temperatura e efeito do vento. Para esse autor, a predição de níveis de pressão sonora em áreas externas adjacentes a fontes de ruídos requer a análise da propagação de som ao ar livre.

Langdon e Scholes (1968), *apud* Calixto (2002), definem o Índice de Ruído de Tráfego (*TNI*) como uma combinação ponderada de  $L_{A10}$  e  $L_{A90}$ , com a seguinte expressão:  $TNI = 4(L_{A10} - L_{A90}) + L_{A90} - 30$ , sendo os níveis  $L_{A10}$  (definido como o nível de ruído que é ultrapassado em 10% do tempo total de medição) e  $L_{A90}$  (definido como o nível de ruído que é ultrapassado em 90% do tempo total de medição), ponderados pela curva A, medidos em ambiente

externo como uma função contínua do tempo, ou amostrados em numerosos intervalos discretos de tempo, num período de 24 horas.

### **2.1.2 Contenção do Ruído de Tráfego Através de Elementos Externos de Edificações**

Quirt (1983), *apud* Aviz (2006), através de dados experimentais de perda de transmissão sonora para janelas de vidro duplo (partição de vidro comum separados por uma câmara de ar) e triplo (partição de vidro laminado mais comum separados por uma câmara de ar), fez comparações com as predições de diversos modelos teóricos. Equações simples que fornecem um ajuste empírico satisfatório aos dados foram propostas. Assim, a perda de transmissão do vidro duplo foi comparada à perda de transmissão do vidro triplo, com resultados muito similares quando os afastamentos combinados dos painéis da janela tripla coincidem com o afastamento do vidro duplo. O vidro triplo, entretanto, exibiu uma perda de transmissão mais elevada consistentemente em frequências abaixo da ressonância.

Fujimoto (2004) mostra, por comparação, que através do estudo do modelo modal de salas, a aplicação da teoria das ondas sonoras é muito útil para as baixas frequências, mas não é conveniente para análise do campo sonoro quando se trata de frequências médias e, principalmente, das altas, devido ao grande número de modos que surgem. Nesse caso, o uso de modelos geométricos se torna mais interessante. A teoria ondulatória é, então, desconsiderada e é adotada a teoria de raios acústicos, em analogia a raios luminosos. Tal como na ótica geométrica, os raios partem uniformemente da fonte e espalham-se na sala, refletindo-se, com atenuação, em cada superfície que atingem. O fenômeno da reflexão é um dos mais importantes a ser considerado, podendo ser especular ou difuso. Fenômenos como a refração e difração são, em princípio, desconsiderados, o mesmo ocorrendo com a interferência ondulatória.

A capacidade de determinado material ou estrutura em absorver e isolar o ruído são as principais medidas de seu desempenho acústico e que, frequentemente, as funções de absorção e isolamento sonora são confundidas (BISTAFA, 2006). A absorção sonora é utilizada, principalmente, para controle do tempo de reverberação em recintos, embora a incorporação de absorção implique também na redução de poucos decibéis no ruído desse recinto. No entanto, o conforto acústico gerado com o aumento da absorção, normalmente dá a impressão de que os níveis sonoros foram reduzidos mais do que as medições objetivas revelam. Por outro lado, a isolamento sonora, medida através da perda de transmissão ( $PT$ ), é utilizada para impedir que o ruído de um recinto seja transmitido para um recinto contíguo, ou deste último para o primeiro, ou seja, uma estrutura com características isoladoras é geralmente densa e refletora, normalmente oferecendo propriedades estruturais.

### **2.1.3 Principais Normas Utilizadas**

A NBR 10151 (2000) fixa as condições exigíveis para avaliação da aceitabilidade do ruído em comunidades, independente da existência de reclamações. Especifica um método para a medição de ruído, a aplicação de correções nos níveis medidos se o ruído apresentar características especiais e uma comparação dos níveis corrigidos com um critério que leva em conta vários fatores. Seu método de avaliação envolve as medições do nível de pressão sonora equivalente ( $L_{Aeq}$ ), em dB(A), salvo que o nível corrigido ( $L_c$ ) para ruído com características impulsivas ou de impacto é determinado pelo valor máximo medido com o medidor de nível de pressão sonora ajustado para resposta rápida (*fast*), acrescido de 5 dB(A).

A NBR 10151 (2000) estabelece também que o medidor de nível de pressão sonora deve ser tipo 0, 1 ou 2, com capacidade integradora para medição do  $L_{Aeq}$ , assim como o calibrador acústico, o qual deve ser classe 2, ou melhor. O medidor de nível de pressão sonora e o calibrador acústico devem ter certificado de calibração da Rede Brasileira de Calibração (RBC) ou do Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (INMETRO), renovado no máximo a cada dois anos.

A NBR 10151 (2000) cita ainda todos os procedimentos para a realização de medições no exterior e interior de edificações. Assim, as medições no ambiente externo devem ser efetuadas a 1,2 m acima do solo e, no mínimo, a 1,5 m de paredes, edifícios e outras superfícies refletoras. Quando as circunstâncias exigirem, as medições podem ser efetuadas a diferentes alturas e próximo a paredes (por exemplo, 0,5 m em frente a uma janela aberta), desde que isto esteja especificado e levado em consideração.

A NBR 10152 (1987) fixa os níveis de ruído compatíveis com o conforto acústico em ambientes diversos. O método de avaliação recomendado, baseado nas medições do nível sonoro em dB(A), é apresentado. Todavia, a análise em bandas de frequência de um ruído é sempre importante para objetivos de avaliação e adoção de medidas de correção ou redução do nível sonoro. Assim sendo, tal análise é realizada a partir da utilização de curvas de avaliação de ruído (NC), através das quais um espectro sonoro pode ser comparado, permitindo a identificação das bandas de frequências mais significativas.

A Norma ISO 140 (1997) especifica um método de medição em laboratório, da isolação sonora transportada por via aérea de elementos de edificação. Segundo a Norma ISO 3741(1999), relativa à determinação de níveis de potência sonora em câmaras reverberantes, a relação de quaisquer das dimensões não deve igualar ou aumentar um inteiro (AVIZ, 2006).

## CAPÍTULO 3

### 3.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1.1 O Conceito de Som e Ruído

Segundo Bistafa (2006), o som é a sensação produzida no sistema auditivo e ruído é um som, em geral, de conotação negativa, um “som indesejável”. Este autor afirma ainda que sons são vibrações das moléculas do ar que se propagam a partir de estruturas vibrantes, mas que nem toda estrutura que vibra gera som.

Em sua definição de ruído como “som indesejável”, Bistafa (2006) insinua o julgamento da serventia do som, o qual depende do contexto, ou seja, ruídos de serras elétricas, ou sobrevôos de helicópteros poderiam ser qualificados como ruídos indesejáveis se a circunstância fosse a de se tentar dormir. Por outro lado, poderiam ser totalmente desejáveis nos casos de controle de produção, ou de um resgate por via aérea, respectivamente.

Neste trabalho, usar-se-á o conceito de ruído, em particular o de tráfego, como um som indesejável, de conotações totalmente negativas.

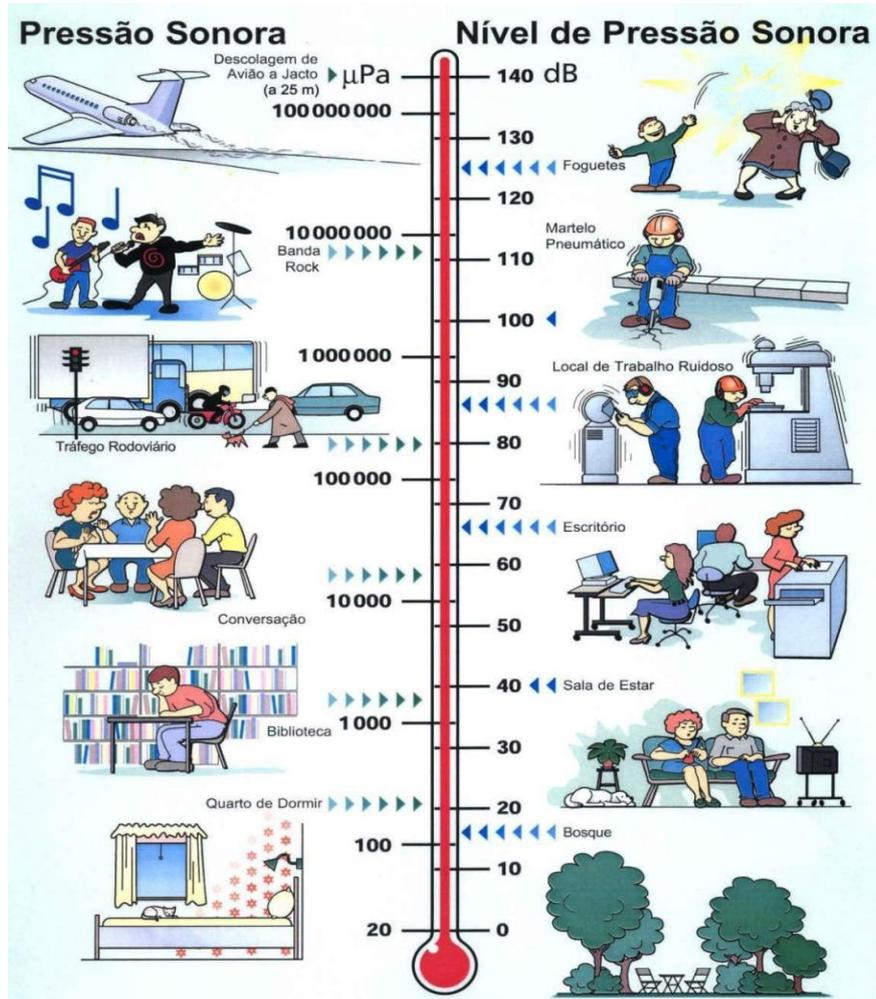
#### 3.1.2 O Limiar de Audibilidade

Em geral, os sistemas auditivos possuem dois limites de audibilidade, já que a percepção do volume está relacionada à variação de pressão gerada por uma onda sonora e, portanto, à sua intensidade. São eles: o limiar de audibilidade, ou a mínima intensidade audível, e o limiar da dor, que nada mais é do que o máximo nível de intensidade audível suportável.

A diferença entre os dois limites é muito grande. Para uma frequência pura de 1000 Hz, esses limites vão de  $10^{-12}$  watt/m<sup>2</sup> a 1 watt/m<sup>2</sup>, ou seja, uma razão de 1 trilhão para 1.

A Fig. 3.1 ilustra essa diferença e mostra a relação entre pressão sonora em  $\mu$ Pa e nível de pressão sonora em dB.

Figura 3.1 – Diferença entre o limiar de audibilidade e o limiar da dor, e relação entre pressão sonora e nível de pressão sonora produzido por algumas fontes de ruído



Fonte: [www.bksv.com.br](http://www.bksv.com.br)

### 3.1.3 A Intensidade Sonora

Define-se como intensidade sonora,  $I_r$ , a quantidade média de energia na unidade de tempo que atravessa uma área unitária perpendicular à direção de propagação da onda, dada em watt por metro quadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) e descrita por:

$$I_r = \frac{P_{\text{eficaz}_r}^2}{\rho c} \quad (3.1)$$

Onde  $P_{\text{eficaz}_r}$  é o valor eficaz da pressão sonora à distância  $r$  de uma fonte sonora esférica e  $\rho c$  é a impedância característica do meio de propagação.

### 3.1.4 A Potência Sonora

Em uma onda esférica, o produto da intensidade sonora pela área da superfície esférica ( $4\pi r^2$ ) que envolve a fonte esférica, à distância  $r$  dessa esfera, resulta na potência sonora  $W$  irradiada pela fonte sonora esférica, dada por:

$$W = I_r \cdot 4\pi r^2 \quad (3.2)$$

A partir das Equações (3.1) e (3.2), pode-se obter a relação entre intensidade sonora, potência sonora e pressão sonora:

$$I_r = \frac{W}{4\pi r^2} = \frac{p_{\text{eficaz}}^2}{\rho c} \quad (3.3)$$

### 3.1.5 Relação entre as Grandezas Intensidade, Potência e Pressão Sonora

Bistafa (2006) relacionou a utilização das grandezas, intensidade, potência e pressão sonora, a partir de uma analogia entre som e calor, descrevendo que a energia térmica por unidade de tempo gerada por um aquecedor aumenta a temperatura  $T$  em uma sala, a qual pode ser medida com a utilização de um simples termômetro. No entanto, a temperatura em determinado ponto da sala não irá depender somente da potência do aquecedor. Outros fatores deverão influenciar o valor de temperatura medido, como a distância entre a fonte térmica e o ponto de medição, a quantidade de calor absorvida pelas fronteiras, a quantidade de calor transferida através das paredes, janelas, etc.

Analogamente, uma fonte sonora gera certa quantidade de energia sonora em função do tempo, ou seja, gera certa potência sonora,  $W$ , independentemente do meio ambiente. Essa taxa de energia sonora irradiada para o ambiente irá gerar certa pressão sonora em determinado ponto e, assim como no caso térmico, o valor da pressão sonora irá depender da distância entre a fonte sonora e o ponto de medição, da parcela de energia sonora dissipada pelas fronteiras e daquela que é transmitida pelas paredes, janelas, etc.

Bistafa (2006) conclui afirmando que a principal característica de uma fonte sonora é sua potência sonora e não a pressão sonora produzida pela mesma em determinado ponto do ambiente. Assim, a potência sonora indica a capacidade de uma fonte sonora gerar som, constituindo-se numa característica intrínseca desta fonte.

Quanto à intensidade sonora, Bistafa (2006) afirma que esta é um indicador da magnitude, direção e sentido de propagação da energia sonora, sendo uma grandeza vetorial. Dessa forma, fornece a indicação do fluxo de energia sonora que atravessa uma superfície, ou seja, é uma grandeza utilizada na localização e quantificação de fontes sonoras.

Finalmente, tal autor afirma que a pressão sonora é uma grandeza física fortemente correlacionada com a sensação subjetiva de intensidade do som, ou seja, o quão intenso é determinado som escutado. Assim, a pressão sonora é a grandeza mais importante para caracterizar os efeitos do som sobre o ser humano e sua vantagem é a de poder ser medida diretamente com a utilização de um microfone conectado a um sistema de condicionamento de sinal.

### 3.1.6 Os Níveis de Potência, Intensidade e Pressão Sonora

As equações seguintes definem, respectivamente, os níveis de potência, intensidade e pressão sonora:

$$NWS = 10 \text{ Log} \left( \frac{W}{10^{-12}} \right) \quad (3.4)$$

$$NI = 10 \text{ Log} \left( \frac{I}{10^{-12}} \right) \quad (3.5)$$

$$NPS = 20 \text{ Log} \left( \frac{P}{2 \cdot 10^{-5}} \right) \quad (3.6)$$

### 3.1.7 A Diferença de Nível ( $D$ )

Segundo Gerges (2000), a redução de ruído, através do uso de dispositivos como paredes ou enclausuramentos, pode ser quantificada pela Diferença de nível de pressão acústica ( $D$ ), que expressa a diferença entre os níveis de pressão sonora nas salas emissora e receptora. Matematicamente tem-se:

$$D = NPS_1 - NPS_2 \quad (3.7)$$

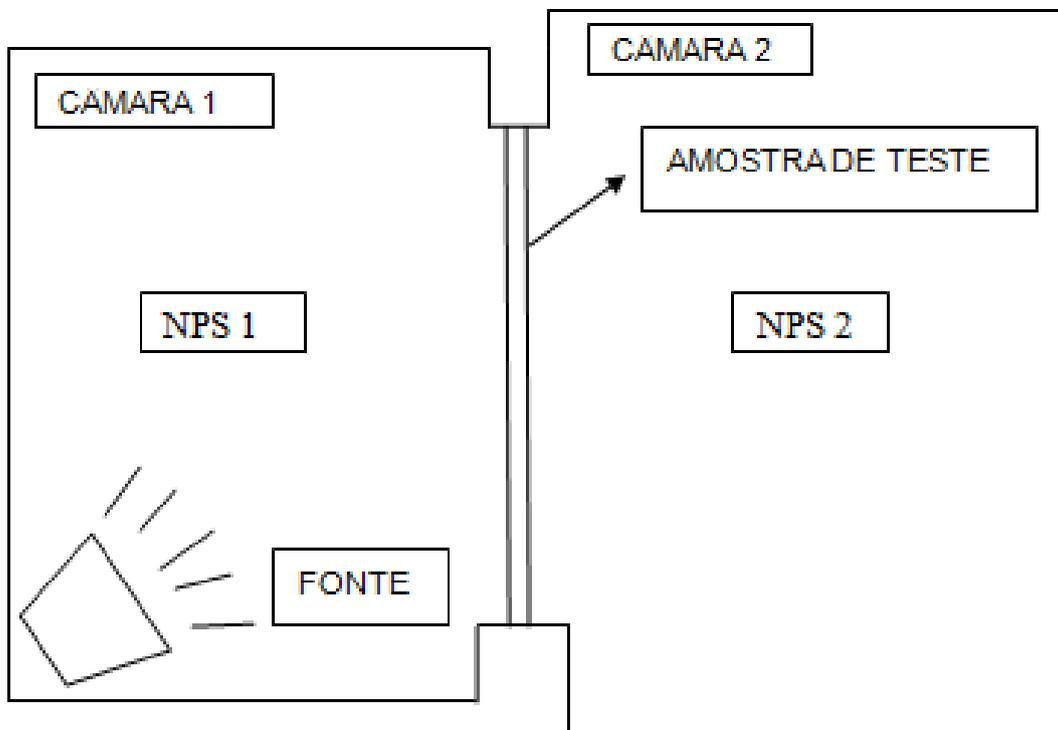
Onde  $NPS_1$  é o nível de pressão sonora na sala emissora (sala que contém a fonte sonora) e  $NPS_2$  é o nível de pressão sonora na sala receptora.

Ainda segundo o autor,  $D$  não depende apenas das características intrínsecas dos materiais, mas também de outros fatores como: local de medição dos níveis de pressão sonora, volume do enclausuramento, orifícios existentes, absorção acústica, etc.

### 3.1.8 Medição da Perda de Transmissão Sonora com duas Câmaras Reverberantes

A medição da perda de transmissão ( $PT$ ) de uma amostra de material é feita posicionando-se a amostra entre as duas câmaras reverberantes (ISO R 140, 1978). Mede-se então o nível de pressão acústica médio no espaço e no tempo em cada câmara, colocando-se em uma delas uma fonte sonora. A Fig. (3.2) ilustra o enunciado.

Figura 3.2 – Medição de  $PT$  usando duas câmaras reverberantes



Fonte: Próprio autor

O coeficiente de transmissão é definido como a razão entre a energia transmitida para a câmara 2 ( $W_2$ ) e a energia incidente na amostra na câmara 1 ( $W_1$ ):

$$\tau = \frac{W_2}{W_1} \quad (3.7)$$

A perda de transmissão da amostra pode então ser calculada como:

$$PT = 10 \log \frac{1}{\tau} \quad (3.8)$$

### 3.1.9 O Nível Equivalente $L_{Aeq}$

O potencial de danos à audição causado por um dado ruído depende não somente de seu nível, mas também de sua duração. Uma exposição de um minuto a 100 dB não é tão prejudicial quanto uma exposição de 60 minutos a 90 dB. Assim, é possível estabelecer um valor único  $L_{Aeq}$  que é o nível sonoro médio integrado durante uma faixa de tempo especificada. O cálculo é baseado na energia do ruído (pressão sonora quadrática) dado por:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P^2(t)}{P_0^2} dt \quad (3.8)$$

Onde:

$T$  é o tempo de integração;

$P(t)$  é a pressão acústica instantânea;

$P_0$  é a pressão acústica de referência ( $2 \times 10^{-5}$  Pa);

$L_{Aeq}$  representa o nível contínuo (estacionário) equivalente em dB(A), que tem o mesmo potencial de lesão auditiva que o nível variável considerado.

### 3.1.10 O Coeficiente de Absorção Sonora $\alpha$

A Tab. (3.1) mostra os coeficientes de absorção sonora de alguns materiais que serão usados neste trabalho.

Tabela 3.1 – Coeficientes de absorção sonora de materiais comuns em edificações.

Material	Espessura (cm)	Freq (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Lã de rocha	10	0,65	0,82	0,85	1,00	1,00	1,00
Carpete forração	0,5	0,10		0,25		0,40	
Concreto aparente		0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03
Cortina de algodão com dobras		0,07	0,31	0,49	0,81	0,61	0,54
Feltro	1,2	0,02	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Lã d e vidro	10	0,29	0,55	0,64	0,75	0,80	0,85
Mármore		0,01		0,01		0,02	
Parede de Alvenaria		0,02	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07
Piso de madeira sobre vigas		0,15	0,11	0,10	0,07	0,06	0,07
Placas de cortiça sobre concreto	0,5	0,02	0,02	0,03	0,03	0,04	0,04
Tábua de pinho	2,5		0,16	0,13	0,10	0,06	0,06
Tapete de lã	1,5	0,20	0,25	0,35	0,40	0,50	0,75
Vidro		0,18	0,06	0,04	0,03	0,03	0,02

Fonte: Zannin *et al.* (1996).

### 3.1.11 Determinação do $\alpha$ em Câmara Reverberante

A determinação do coeficiente de absorção  $\alpha$  de uma amostra em câmara reverberante consiste, segundo a norma ISO 354-6, em colocar uma amostra do material no piso da câmara reverberante, medindo-se o tempo de reverberação  $TR_{60}$  da câmara com a amostra. Posteriormente, mede-se o tempo de reverberação  $TR'_{60}$  da câmara sem a amostra. Dessa forma, é possível calcular o coeficiente de absorção da amostra por banda de frequência através de:

$$\alpha_{Sab} = 0,161 \frac{V}{S} \left( \frac{1}{TR_{60}} - \frac{1}{TR'_{60}} \right) \quad (3.9)$$

Onde:

V é o volume da câmara em m<sup>3</sup>;

S é área da amostra em m<sup>2</sup>.

### 3.1.12 O Tempo de Reverberação de um Ambiente

O tempo de reverberação de um ambiente é definido como o tempo necessário para que a intensidade de um som puro de 512 Hz se reduza a um milionésimo de seu valor inicial (redução de 60 dB), a partir do momento no qual a fonte cessa de emití-lo; isto porque a intensidade energética média dos sons musicais e da palavra é cerca de um milhão de vezes (60 dB) superior ao da linha limite de audibilidade.

O cálculo do tempo de reverberação pode ser obtido pelas equações de Sabine ou Eyring, por exemplo, as quais levam em consideração o volume da sala e os materiais de revestimento das paredes, com seus respectivos coeficientes de absorção sonora, e tornam-se bastante pertinentes para este trabalho. Dessa forma, tem-se a equação de Sabine dada por:

$$TR = \frac{0,161 \cdot V}{A + xV} \quad (3.10)$$

Onde:

$TR$  = tempo de reverberação do ambiente estudado em (s);

$V$  = volume da sala em  $m^3$ ;

$A$  = área de absorção sonora equivalente devido aos elementos construtivos do local (paredes, teto, piso e janelas), em  $m^2$ ;

$x$  = coeficiente de absorção do ar por unidade de volume.

A área de absorção sonora equivalente ( $A$ ) é dada por:

$$A = \sum_{i=1}^n \alpha_i S_i \quad (3.11)$$

Onde:

$\alpha_i$  = coeficiente de absorção sonora de cada elemento construtivo;

$S$  = área do respectivo elemento construtivo.

Já para a equação de Eyring, a qual apresenta uma correção para a equação de Sabine quando o valor de  $\alpha$  é grande, tem-se:

$$TR = \frac{-0,161 \cdot V}{S \ln(1 - a_m)} \quad (3.12)$$

Onde  $S$  é a área total das paredes do ambiente e  $a_m$  é dado por:

$$a_m = \frac{\sum_{i=1}^n S_i a_i}{S} \quad (3.13)$$

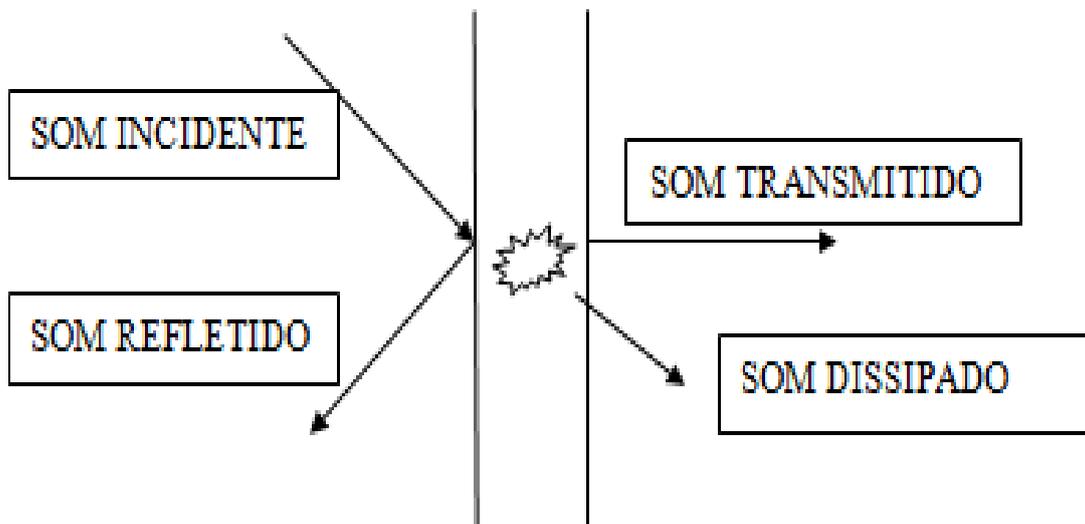
Uria (2005) comparou as duas equações com as seguintes conclusões:

- A Fórmula de Sabine deve ser usada quando o coeficiente médio de absorção for baixo (menor que 0,2), quando os materiais absorventes estiverem distribuídos uniformemente, quando os coeficientes de absorção não forem precisos e, finalmente, quando não for exigida grande precisão de cálculo.
- A Fórmula de Eyring deve ser usada quando os materiais absorventes estiverem distribuídos uniformemente, quando se conhece com exatidão os coeficientes de absorção e quando se exige grande precisão de cálculo.

### 3.1.13 A Reflexão Sonora

Um som incidente em uma superfície pode ser refletido de forma especular ou difusa. Tais fenômenos podem ocorrer simultaneamente. Por exemplo, uma onda sonora pode ao mesmo tempo ser refletida e absorvida por um obstáculo, conforme mostrado na Fig. 3.3.

Figura 3.3 – O fenômeno da reflexão sonora



Fonte: Próprio autor

Dessa forma, podem ser definidos os coeficientes de absorção,  $\alpha$ , de reflexão,  $r$ , e de transmissão,  $\tau$ , conforme segue:

$$\alpha = \frac{\text{ENERGIA ABSORVIDA}}{\text{ENERGIA INCIDENTE}} \quad (3.14)$$

$$r = \frac{\text{ENERGIA REFLETIDA}}{\text{ENERGIA INCIDENTE}} \quad (3.15)$$

$$\tau = \frac{\text{ENERGIA TRANSMITIDA}}{\text{ENERGIA INCIDENTE}} \quad (3.16)$$

### 3.1.14 A Equação Básica da Propagação Sonora ao Ar Livre

A expressão que descreve o decaimento do nível sonoro ao ar livre, a partir de uma fonte esférica é dada por:

$$L_p(r, \theta) = L_W - 20 \text{ Log } r + D_{I\theta} - 10 \text{ Log } \frac{\Omega}{4\pi} - A_{\text{combinada}} - 11 \quad (3.17)$$

Onde,  $\Omega$  é o ângulo sólido e  $A_{\text{combinada}}$  é a combinação de todos os mecanismos significativos de atenuação sonora entre a fonte e o receptor.

Para fontes sonoras de tráfego rodoviário, costuma-se omitir  $DI_{\theta}$  da equação por duas razões: a primeira é que a diretividade de tais fontes é minimizada por: a) múltiplas reflexões e espalhamento sonoro provocado por superfícies e obstáculos próximos; b) espalhamento sonoro devido à turbulência atmosférica; e c) múltiplas fontes que assumem diferentes posições angulares em dado instante, por exemplo, quando os veículos estão enfileirados em uma via de tráfego. A segunda razão é que um índice de diretividade positivo numa determinada banda de frequência pode ser compensado por um índice negativo em outra banda, quando essas bandas são combinadas na determinação do nível total A-ponderado (BISTAFA 2006).

### 3.1.15 Modos Acústicos

Para uma sala retangular, as frequências naturais de vibração do volume de ar são dadas por:

$$f_n \frac{c_0}{2} = \sqrt{\left[\frac{n_x}{L_x}\right]^2 + \left[\frac{n_y}{L_y}\right]^2 + \left[\frac{n_z}{L_z}\right]^2} \quad \text{Eq. (3.18)}$$

Onde:

$n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  são números inteiros positivos;

$L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  são as dimensões da sala retangular.

A Eq. (3.18) poderá ser utilizada no cálculo dos modos axiais, tangencias e oblíquos em ambientes com forma de paralelepípedo.

## 3.2 O RUÍDO DE TRÁFEGO EM EDIFICAÇÕES

Neste tópico, são apresentadas as definições de alguns fenômenos sonoros com grande influência na propagação de ruídos. As definições de tais fenômenos são fundamentais para corroborar os resultados das formulações existentes, utilizadas neste trabalho.

### 3.2.1 A Atenuação do Ruído com a Distância

A atenuação do nível de pressão sonora com a distância depende da distribuição das fontes de ruído (GERGES, 2000). Vários tipos de distribuição podem ser considerados, mas neste trabalho será considerada a distribuição de fontes lineares. Dessa forma, um fluxo de veículos em uma estrada, ou um duto longo transportando fluido turbulento ruidoso podem ser considerados como fontes sonoras em linha, de comprimento  $l$ . Neste caso, tem-se:

$$NPS = NWS + DI(\theta) - 10 \log 2\pi r l \quad (3.19)$$

Onde:

$DI(\theta)$  é o índice de diretividade =  $10 \log Q(\theta)$ ;

$Q(\theta)$  é o fator de diretividade de superfície.

Então, o  $NPS$  decai 3 dB para cada dobro da distância  $r$ .

A relação entre  $NPS_1$  (na distância  $r_1$ ) e  $NPS_2$  (na distância  $r_2$ ), na mesma direção  $\theta$  é dada por:

$$NPS_1 - NPS_2 = 10 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (3.20)$$

Conclui-se que a predição dos níveis de pressão sonora em qualquer distância  $r_2$  pode ser obtida a partir de um nível medido em qualquer outra distância  $r_1$ .

### 3.2.2 A Absorção do Som ao Ar Livre

Como o ar não é um meio perfeitamente elástico, durante suas sucessivas compressões e rarefações ocorrem vários processos de absorção sonora que dependem da frequência (GERGES, 2000). A expressão para o coeficiente de atenuação por absorção clássica no ar a 20 °C,  $\alpha_1$ , é dada em função da frequência,  $f$ , por:

$$\alpha_1 = 1,2 \cdot 10^{-10} f^2 \quad (3.21)$$

Outro efeito na absorção do ar é conhecido como relaxamento molecular e ocorre pela dissipação de energia durante o processo de relaxamento vibratório das moléculas de oxigênio que compõem cerca de 21% do ar atmosférico. O processo é dependente da umidade, temperatura e pressão (GERGES, 2000). Para 20 °C, a absorção por relaxamento molecular é dada aproximadamente por:

$$\alpha_2 \cong \frac{7,4 f^2 10^{-9}}{u(1+4 \cdot 10^{-6} \Delta t f)} \quad (3.22)$$

Onde:

$u$  é a umidade relativa em %;

$\Delta t$  é a diferença de temperatura relativa a 20 °C.

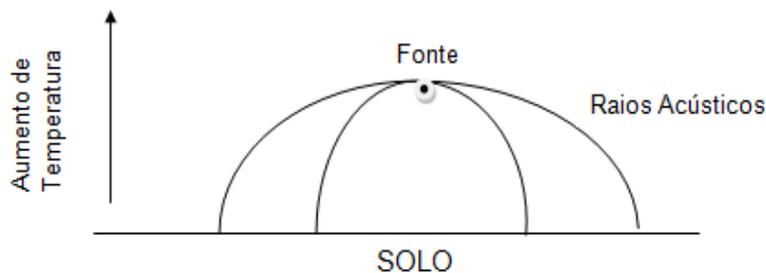
Portanto, a absorção total do ar é dada por:

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2 \quad (3.23)$$

### 3.2.3 O Efeito das Condições Meteorológicas

Os caminhos de propagação do som sofrem fortes influências da temperatura e velocidade do ar (GERGES, 2000). Assim, o aumento de temperatura com a altura provoca um aumento das velocidades de frente de ondas, causando assim, mudança na direção das ondas ascendentes, ou seja, as ondas são empurradas na direção do solo. A Fig. 3.4 ilustra o enunciado.

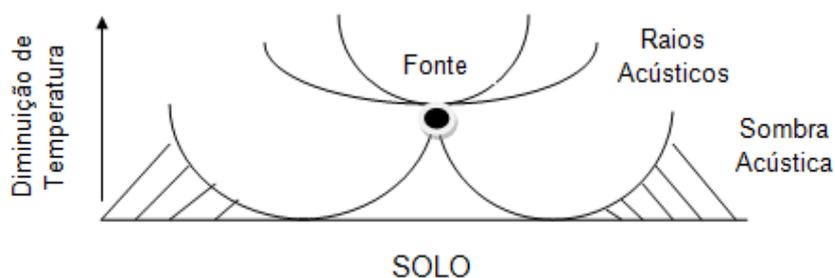
Figura 3.4 – Efeito de aumento da temperatura com a altura



Fonte: Gerges 2000

Se a temperatura diminuir com a altura, as frentes de ondas descendentes divergem, afastando-se do solo e formando uma sombra acústica conforme apresentado na Fig. 3.5.

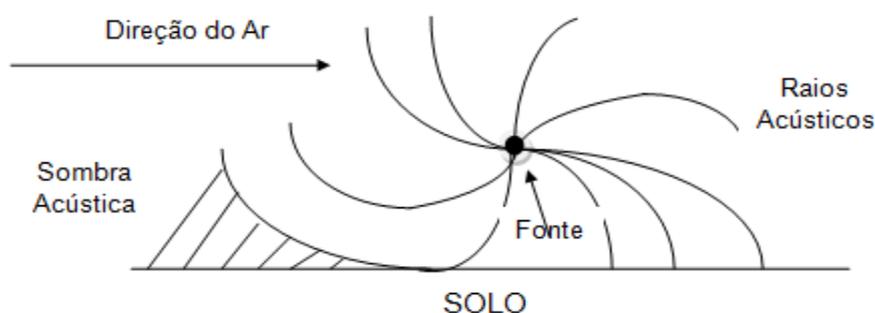
Figura 3.5 – Efeito da diminuição da temperatura com a altura



Fonte: Gerges 2000

Aplicando-se os mesmos conceitos para os efeitos do vento, observa-se a formação de uma zona de sombra acústica na direção de chegada do vento (GERGES, 2000), dificultando a percepção do ruído nesta posição (ver Fig. 3.6).

Figura 3.6 – Variação do caminho das ondas acústicas sob efeito do vento



Fonte: Gerges 2000

### 3.2.4 O Efeito da Vegetação

Para Gerges (2000), zonas de árvores, folhagens, gramas, florestas, etc., são aproveitadas para atenuação de ruído em comunidades. A atenuação causada pela vegetação é geralmente maior nas altas frequências.

Hoover (1961) mostrou que, na média, uma zona de árvores densa de 10 m de distância e 20 m de largura fornece 2 dB de atenuação em 2 kHz. Quando existe grama densa e folhagem no solo, esta atenuação aumenta para 4 dB. Este autor afirma ainda, que apesar da vegetação fornecer pouca atenuação de ruído, pode servir como isolador visual do receptor, fornecendo um efeito psicológico favorável.

Kragh *et al.* (1982) apresentaram as seguintes considerações, de interesse deste trabalho, para quantificar a atenuação causada pela vegetação:

- A altura da vegetação deve exceder a altura do caminho de transmissão curvo em pelo menos um metro;
- Um grupo de árvores e arbustos é considerado denso se ao longo do caminho de transmissão é impossível ver através da vegetação, isto é, o caminho de transmissão é visualmente bloqueado;
- Se o caminho de transmissão atravessa um número consecutivo de grupos de árvores e arbustos e cada grupo bloqueia visualmente o caminho de transmissão, fica considerado um número máximo de quatro grupos como influentes na atenuação.

A atenuação  $AT_v$  causada por vegetações é calculada pela seguinte expressão:

$$AT_v = -n_v \alpha_v \quad (3.24)$$

Onde:

$n_v$  é o número de grupos de vegetação;

$\alpha_v$  é o coeficiente de atenuação por grupo.

A Tab. 3.2 mostra valores de  $\alpha_v$  por grupo em dB/grupo, para cada banda de oitava. Se  $n_v > 4$ ,  $n_v$  é tornado igual a 4.

Tabela 3.2 – Valores de  $\alpha_v$  por grupo de vegetação alta e densa.

Freq. (Hz)	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$\alpha_v$ (dB/Grupo)	0	0	1	1	1	1	2	3

Fonte: Gerges (2000).

### 3.2.5 Amplificação Sonora Causada Pela Reverberação nas Fachadas de Edificações

Na cidade de Belém, o processo de verticalização de edificações se intensificou nos últimos anos, como consequência da falta de espaço horizontal e devido ao espaço geográfico no qual a cidade está inserida.

Os modernos projetos de edificações verticais investem em prédios de muitos andares, em consequência da restrição cada vez maior dos espaços horizontais. Tal fato colabora para um fenômeno conhecido como “Amplificação Sonora Causada pela Reverberação Urbana” e desconhecido pela maioria dos profissionais envolvidos nos projetos e construções dessas edificações.

Segundo Bistafa (2006), os “desfiladeiros urbanos” podem amplificar o ruído de tráfego, devido às múltiplas reflexões nas fachadas das edificações que margeiam as vias de tráfego. Assim, tal amplificação sonora,  $AMP_{reverb}$ , pode ser estimada para uma via de tráfego de sentido único através da seguinte expressão:

$$AMP_{reverb} = 10 \log \left[ 1 + \left( \frac{r}{r+2d_{fachada}} \right)^2 (1 - \alpha_e) \right] + R \quad (3.25)$$

Sendo  $R$  dado por:

$$R = 4 \left( \frac{h_{edificação}}{w_{via}} \right) \leq 3dB \quad (3.26)$$

Onde:

$r$  é a distância perpendicular entre o receptor e a via;

$d_{fachada}$  é a distância entre o receptor e a fachada da edificação mais próxima;

$\alpha_e$  é o coeficiente de absorção sonora da fachada da edificação;

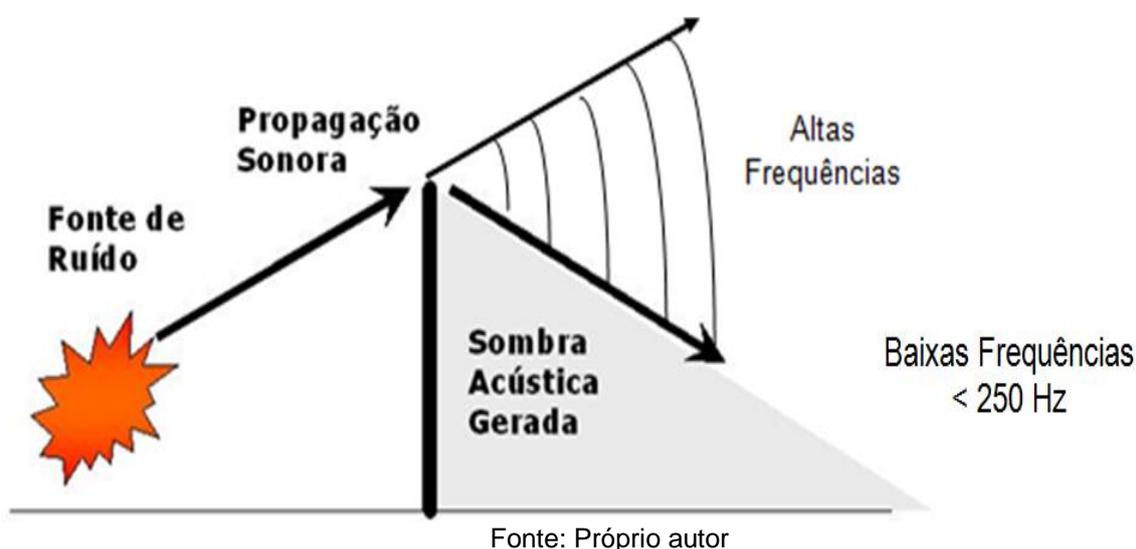
$h_{edificação}$  é a altura da edificação;

$w_{via}$  é a largura da via.

### 3.2.6 Barreiras Acústicas

Dentre alguns elementos externos de edificações, podem-se destacar as barreiras do tipo peitoris de sacadas, cuja finalidade, do ponto de vista da acústica, é refletir parte do ruído externo em direção oposta ao interior dessas edificações. Segundo Gerges (2000), a presença de barreira ou divisor, bloqueia a linha reta de visão entre a fonte e o receptor, causando atenuação por difração. Para este autor, a zona de sombra acústica é maior para barreiras altas e em altas frequências. A Fig. 3.7 ilustra o enunciado.

Figura 3.7 – Barreira destacando a atenuação por difração e a zona de sombra acústica



Assim, a atenuação obtida depende da altura e da posição da barreira e do comprimento da onda acústica. Essas variáveis são incorporadas em um parâmetro adimensional, o número de Fresnel, dado por:

$$N = \frac{A+B-C}{\lambda/2} \quad (3.27)$$

Onde:

$A$  é a distância entre a fonte e o topo da barreira;

$B$  é a distância entre o receptor e o topo da barreira;

$C$  é a distância entre a fonte e o receptor.

Kurze *et al.* (1971) desenvolveram uma equação para cálculo de atenuação no caso da fonte pontual e estenderam o modelo para fontes lineares, subtraindo 2 a 8 dB dos valores de atenuação referentes à fonte pontual.

Assim, para cálculo de atenuação da fonte pontual estendida, para fonte linear, tem-se:

$$AT = 20 \log \left[ \frac{\sqrt{2\pi N}}{\operatorname{tg} h(\sqrt{2\pi N})} \right] + 5 \text{ para } N \geq -0,2 \quad (3.28)$$

$$AT = 0 \text{ para } N \leq -0,2$$

Onde:

$N$  é o número de Fresnel dado pela Eq. (3.27);

$AT$  é a perda por inserção em dB – diferença entre o  $NPS$  sem e com barreira.

Koyasu *et al.* (1973) verificaram, através de ensaios em escala, resultados de atenuação para fontes lineares.

No caso prático de barreira finita, as ondas sonoras dobram por difração não só na borda superior da barreira, mas também nos dois bordos laterais, diminuindo a atenuação. Dessa forma, Mehta *et al.* (1999) calcularam a atenuação para a barreira finita, dada pela seguinte expressão:

$$A_{\alpha} = A_{180^{\circ}}^{\frac{\varphi}{180}} \quad (3.29)$$

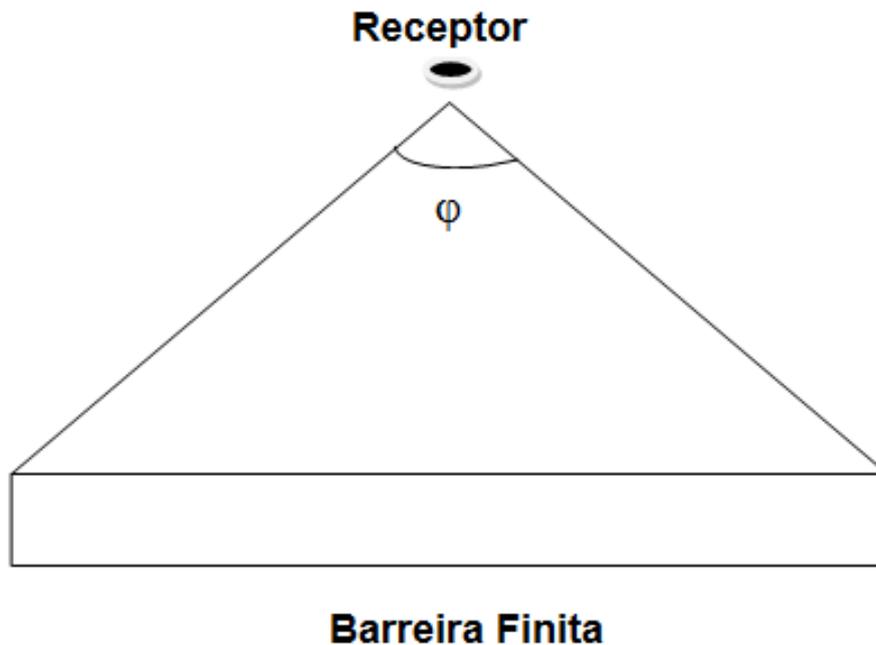
Onde:

$A_{\alpha}$  é a atenuação da barreira que subtende um ângulo  $\varphi$  (em graus) com o receptor;

$A$  é a atenuação da barreira se a mesma fosse infinitamente longa.

A Fig. 3.8 ilustra o enunciado.

Figura 3.8 – Barreira de comprimento finito



Fonte: Próprio autor

A atenuação por transmissão também deve ser incluída no cálculo da atenuação total da barreira. Considerando  $AT_d$  como a atenuação por difração da barreira e  $AT_t$  como a atenuação por transmissão, então a atenuação total é dada por:

$$AT_{total} = AT_d - 10 \log [1 + 10^{(AT_d - AT_t)/10}] \quad (3.30)$$

Para uma máxima atenuação total  $AT_{total}$ , o segundo termo da Eq. (3.30) deve ser o menor possível, isto é,  $AT_{total} \gg AT_d$ . Dessa forma, as barreiras não necessitam ser construídas de material maciço. A densidade superficial dessas barreiras deve estar entre 10 e 20 kg/m<sup>2</sup> para resultados satisfatórios.

### 3.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os principais fenômenos climáticos e sonoros, de interesse deste trabalho, que influenciam a propagação sonora em campo livre.

O capítulo seguinte apresentará os procedimentos de medições de *NPS* nas adjacências e interior de uma edificação modelo com 25 andares, onde serão apresentados resultados de  $L_{Aeq}$  das sacadas dessa edificação em função da altura dos andares, além dos níveis estatísticos  $L_{A10}$  e  $L_{A90}$  medidos em frente à própria edificação, nos horários de grande fluxo de veículos.

## CAPÍTULO 4

### 4.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A crescente verticalização de edificações nas grandes cidades acaba por absorver parte dos vários problemas de ordem ambiental existentes, como por exemplo, o ruído de tráfego diário, problema que tem influência direta na qualidade de vida da população.

Em edificações situadas frontalmente às principais vias de tráfego dessas cidades, o problema do ruído, gerado por veículos leves e pesados, se agrava ainda mais, à medida que aumenta o fluxo desses veículos no decorrer do dia.

Em Belém, esse aumento no fluxo de veículos ocorre principalmente nos horários considerados de pico, isto é, no intervalo das 12 às 13 h e das 17 às 18 h. Nesse intervalo de tempo, o congestionamento de veículos, provocado pelo aumento do número de veículos trafegando, acaba por elevar consideravelmente os níveis de pressão sonora, gerando incômodo à população que habita as proximidades dessas vias.

Assim, escolheu-se uma edificação modelo de 25 andares, ainda em fase de construção, situada na Rua Antônio Barreto – rua que mais se assemelha a uma grande avenida na região central da cidade – para medições de *NPS*. Tais medições foram realizadas em um período de rotina de Belém (dias úteis).

As dependências externas e internas da edificação investigada foram cedidas para as referidas medições, pela Empresa Porte Engenharia e será tratada neste estudo como, “Edificação da Porte com 25 Andares”, sob a sigla “EP25” daqui em diante. A Fig. 4.1 mostra uma vista externa do EP25.

Figura 4.1 – EP25 em fase avançada de construção



Fonte: Próprio autor

Portanto, neste capítulo serão mostrados, detalhadamente, todos os procedimentos adotados para medição de *NPS* nos locais escolhidos para o estudo em questão, com respectivos resultados e mapas dos pontos de medição selecionados.

#### **4.1.1 Medições de Nível de Pressão Sonora em frente ao EP25**

O EP25 localiza-se na Rua Antônio Barreto, entre a Rua 14 de Março e a Avenida Generalíssimo Deodoro, no bairro do Umarizal do município de Belém-PA, cujo fluxo de veículos, em um único sentido, atinge seus maiores picos, como já citado, nos horários das 12 às 13 h e das 17 às 18 h, conforme resultados obtidos nas contagens e medições durante o período de dois meses (novembro e dezembro de 2010).

Neste tópico, são revelados: o nível de pressão sonora equivalente  $L_{Aeq}$ , medido nos horários de pico; o espectro de ruído em bandas de oitava, além dos níveis estatísticos  $L_{A10}$  e  $L_{A90}$  obtidos no mesmo período; e, através do resultado das contagens no local, a quantidade de veículos leves (carros de passeio e motos) e pesados (ônibus, caminhões e vans) que trafegaram na via, durante o período e intervalo de tempo citados.

#### 4.1.2 Procedimentos de Medição

O medidor de *NPS* utilizado para determinação dos níveis na calçada do EP25 foi o BLUE SOLO 01 dB, classe 1. Este equipamento é apropriado para medições de ruído veicular, conforme a norma NBR 97914/ISO 5130. A Fig. 4.2, a seguir, mostra o conjunto medidor, microfone, calibrador.

Figura 4.2 – Conjunto medidor de *NPS* classe 1



Fonte: Próprio autor

As medições de *NPS*, realizadas na calçada em frente ao EP25, tiveram duração de cinquenta minutos em cada período, durante quatro turnos, em dois dias. As condições climáticas nos dois períodos eram boas, com céu claro, temperatura de 34 °C no primeiro período de medições e 30 °C no segundo período de medições.

Nos momentos em que as medições foram realizadas, as operações de construção do EP25 estavam suspensas devido aos horários de almoço e horários de final de expediente, respectivamente. Assim, pode-se afirmar que apenas o ruído de tráfego local e o ruído de fundo da vizinhança influenciaram os resultados das medições.

O equipamento esteve fixado em suporte a 1,5 m de altura do solo, 2,5 m de distância dos limites das residências e 3,0 m de distância da pista de tráfego de veículos. A Fig. 4.3 mostra um desenho esquemático do local das medições na calçada em frente ao EP25.

Figura 4.3 – Desenho esquemático do ponto das medições na calçada



Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.4 mostra a imagem de um dos momentos das medições.

Figura 4.4 – Imagem de um dos momentos das medições



Fonte: Próprio autor

### 4.1.3 Medições realizadas na calçada em frente ao EP25

Para fins de análise final dos resultados, os seguintes dados foram considerados: informação do número de veículos trafegando por minuto, percentual de veículos leves e pesados durante o período de contagem, velocidade média dos veículos no mesmo período de tempo, temperatura do ar e topografia da pista.

Uma vez que não existe uma norma brasileira específica para medição de ruído de tráfego, utilizou-se aqui a metodologia da norma britânica *The Noise Insulation Regulation* (1975), a qual utiliza o nível estatístico  $L_{A10}$  calculado de hora em hora para quantificar o ruído da rodovia. Nesse caso, as medições foram efetuadas em frente à edificação sob investigação.

#### 4.1.3.1 Níveis de Pressão Sonora

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na calçada em frente ao EP25 no horário das 12 às 13 h (primeiro período). A Tab. 4.1 mostra esses resultados nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz em bandas de oitava.

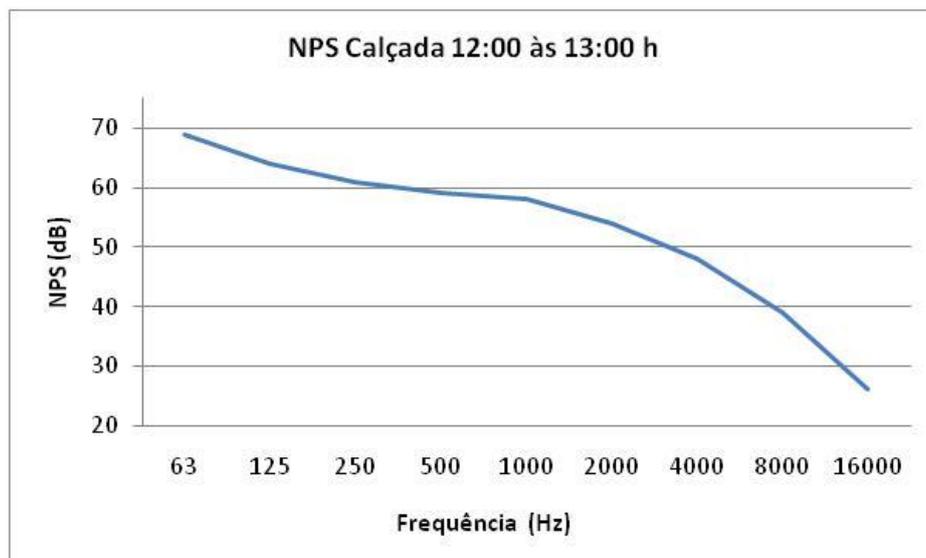
Tabela 4.1 – NPS medido na calçada no primeiro período.

Freq (Hz)	NPS dB (A)
63	69
125	64
250	61
500	59
1000	58
2000	54
4000	48
8000	39
16000	26

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.5 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.1.

Figura 4.5 – Medição no primeiro período em bandas de oitava



Fonte: Próprio autor

O  $L_{Aeq}$  obtido durante o período de medição foi igual a 70,7 dB(A), onde a faixa de frequência centrada em 31,5 Hz foi omitida na tabela, porém não foi negligenciada no cálculo do  $L_{Aeq}$ . Os níveis estatísticos obtidos foram os seguintes:  $L_{A10}$  = 75,0 dB(A) e  $L_{A90}$  = 63,2 dB(A).

A seguir, resultados das medições realizadas na calçada em frente ao EP25 no horário das 17 às 18 h, (segundo período). A Tab. 4.2 mostra esses resultados nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz, em bandas de oitava.

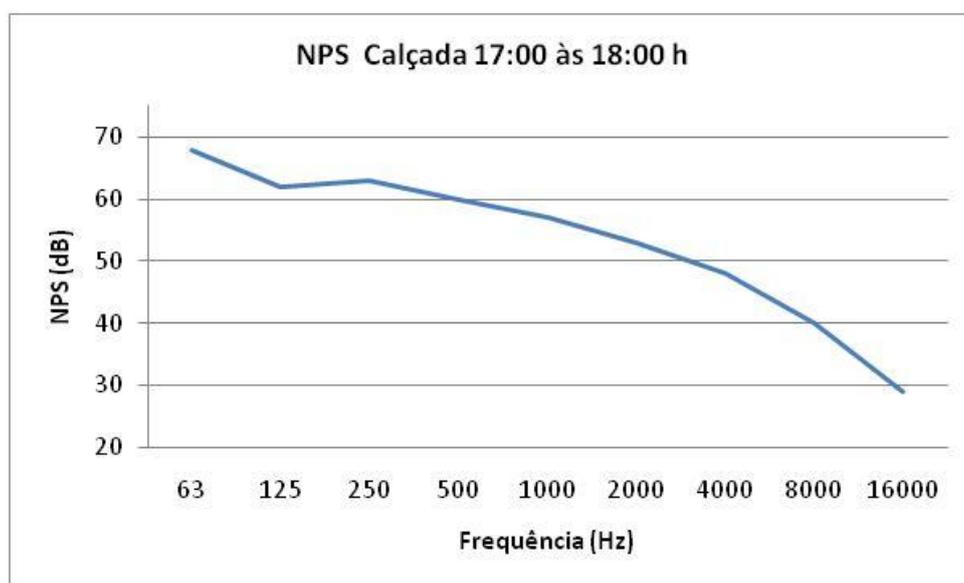
Tabela 4.2 – NPS medido na calçada no segundo período

Freq (Hz)	NPS dB (A)
<b>63</b>	68
<b>125</b>	62
<b>250</b>	63
<b>500</b>	60
<b>1000</b>	57
<b>2000</b>	53
<b>4000</b>	48
<b>8000</b>	40
<b>16000</b>	29

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.6 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.2.

Figura 4.6 – Medição no segundo período, em bandas de oitava



Fonte: Próprio autor

O  $L_{Aeq}$  obtido durante o período de medição foi igual a 71,0 dB(A), onde, novamente, a faixa de frequência centrada em 31,5 Hz foi omitida na tabela, porém não foi negligenciada no cálculo do  $L_{Aeq}$ . Os níveis estatísticos obtidos foram os seguintes:  $L_{A10}$  = 74,0 dB(A) e  $L_{A90}$  = 62,0 dB(A).

#### 4.1.3.2 Contagem de Veículos Durante Cinquenta Minutos

Durante o primeiro período, com cinquenta minutos de contagem sem interrupção, foi conferida a quantidade de veículos trafegando na via, com os resultados apresentados na Tab. 4.3.

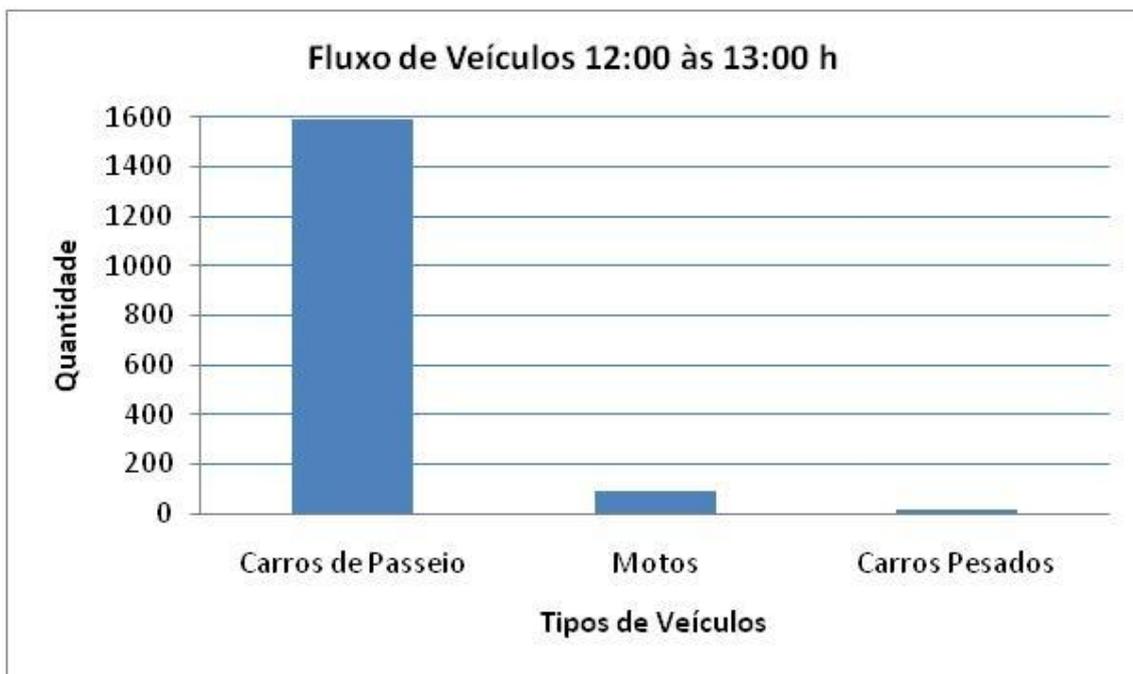
Tabela 4.3 – Quantidade de veículos no primeiro período.

Tipo de Veículo	Quantidade de Veículos no Horário de 12:00 às 13:00 h
<b>Carro de Passeio</b>	1593
<b>Moto</b>	88
<b>Carros Pesados</b>	18

Fonte: Próprio autor

A seguir, na Fig. 4.7 são apresentados os resultados da contagem de veículos no primeiro período, no intervalo das 12 às 13 h.

Figura 4.7 – Contagem de veículos no primeiro período



Fonte: Próprio autor

- Percentual de carros de passeio no primeiro período = 93,80%;
- Percentual de motos = 5,18%;
- Percentual de carros pesados = 1,02%;
- Velocidade média dos veículos no mesmo período de tempo = 40 km/h;
- Temperatura do ar = 34 °C;
- Topografia da pista = pista plana.

Durante o segundo período, com cinquenta minutos de contagem sem interrupção, foi conferida a quantidade de veículos trafegando na via, com os resultados apresentados na Tab. 4.4.

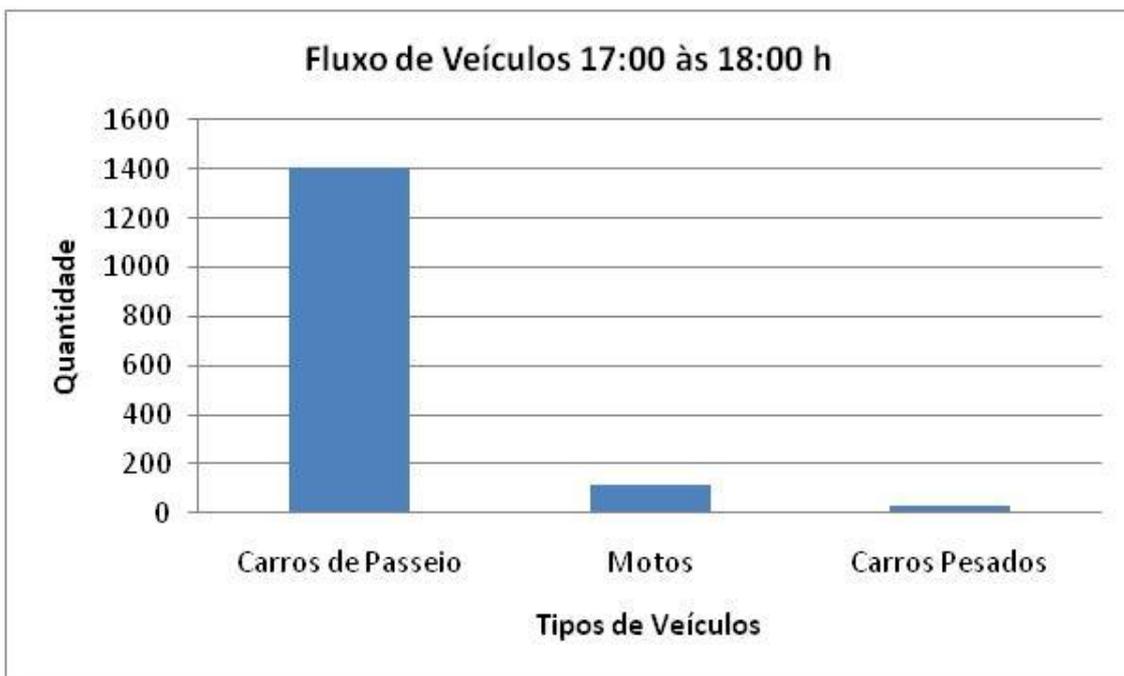
Tabela 4.4 – Quantidade de veículos no segundo período

Tipo de Veículo	Quantidade de Veículos no Horário de 17:00 às 18:00 h
<b>Carro de Passeio</b>	1408
<b>Moto</b>	114
<b>Carros Pesados</b>	31

Fonte: Próprio autor

A seguir, a Fig. 4.8 com os resultados da contagem de veículos no segundo período, no intervalo das 17 às 18 h.

Figura 4.8 – Contagem de veículos no segundo período.



Fonte: Próprio autor

- Percentual de carros de passeio no segundo período = 90,66%;
- Percentual de motos = 7,34%;
- Percentual de carros pesados = 2,00%;
- Velocidade média dos veículos no mesmo período de tempo = 40 km/h;
- Temperatura do ar = 30 °C;
- Topografia da pista = pista plana.

#### 4.1.3.3 Interpretação dos Resultados

Observaram-se variações desprezíveis nos valores de  $L_{Aeq}$  bem como, dos níveis estatísticos na comparação dos dois períodos estudados, além de pouca variação no Índice de Ruído de Tráfego ( $TNI$ ) para os dois períodos.

Langdon *et al.* (1968), definem o Índice de Ruído de Tráfego ( $TNI$ ) como uma combinação ponderada de  $L_{A_{10}}$  e  $L_{A_{90}}$ , com a seguinte expressão:

$$TNI = 4 (L_{A10} - L_{A90}) + L_{A90} - 30 \quad (4.1)$$

Para o primeiro período tem-se:

$$TNI_{\text{primeiro período}} = 4 (75 - 63,2) + 63,2 - 30$$

$$TNI_{\text{primeiro período}} = 80,4$$

Para o segundo período tem-se:

$$TNI_{\text{segundo período}} = 4 (74 - 62,0) + 62,0 - 30$$

$$TNI_{\text{segundo período}} = 80,0$$

A maior variação considerável de *NPS* foi para a banda de 16 kHz, com 3 dB de reforço no segundo período de medições. Para as outras bandas a variação foi menor que 3 dB. Isso demonstra uma característica de homogeneidade do ruído de tráfego ao longo do tempo.

A quantidade total de veículos de passeio trafegando na via, no primeiro período foi maior que no segundo. O mesmo não aconteceu com motos e veículos pesados, onde a quantidade desses veículos, no segundo período, foi maior. Em termos percentuais, a quantidade de veículos pesados trafegando quase dobrou no segundo período.

A quantidade de veículos trafegando na via durante o primeiro período foi de, aproximadamente, trinta e quatro veículos por minuto. Já no segundo período, essa quantidade diminuiu para, aproximadamente, trinta e um veículos por minuto.

#### **4.1.4 Medições de *NPS* nas Sacadas de Apartamentos do EP25**

Neste tópico, são apresentados os níveis de pressão sonora equivalentes,  $L_{Aeq}$ , em cinco pontos nas sacadas dos apartamentos nos 3º, 13º e 21º andares, medidos nos horários de pico, além dos espectros de ruído em bandas de oitava.

#### 4.1.5 Procedimentos Metodológicos

O medidor de *NPS* utilizado para determinação dos níveis nas sacadas do EP25, foi o SOLO SLM 01 dB, classe 2. Este equipamento é apropriado para medições de ruído veicular conforme a norma NBR 97914/ISO 5130. A Fig. 4.9, a seguir, mostra o Conjunto Medidor, Microfone, Calibrador.

Figura 4.9 – Conjunto medidor de *NPS* classe 2



Fonte: Próprio autor

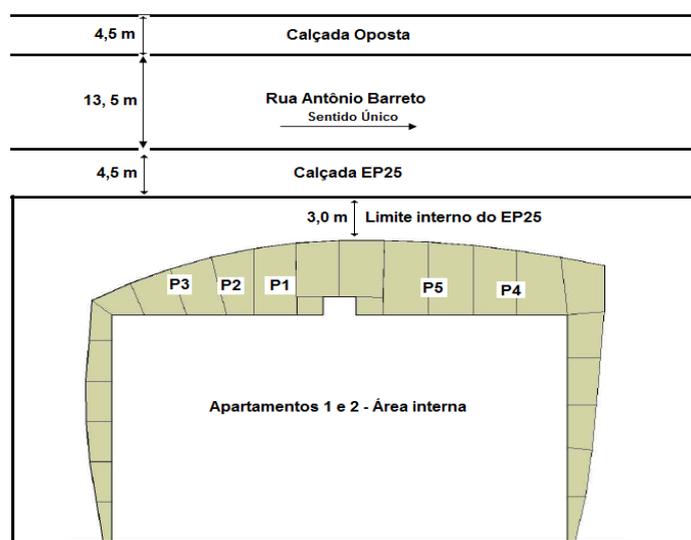
As medições de *NPS*, realizadas em três sacadas (sacadas do 3º, 13º e 21º andares) do EP25, foram realizadas de acordo com as orientações da NBR 10151.

As medições foram realizadas em cinco pontos por andar, dispostos em duas sacadas frontais à Rua Antônio Barreto, sendo dez minutos de medição para cada ponto, com cinquenta minutos de duração em cada período, durante três dias consecutivos. As condições climáticas nos dois períodos eram boas, com céu claro, temperatura de 34 °C no primeiro período de medições e 30 °C no segundo período de medições.

No referido período das medições, as operações de construção do EP25 estavam suspensas devido aos horários de almoço e horários de final de expediente, respectivamente.

O equipamento de medição esteve fixado em suporte a 1,2 m de altura do piso da sacada, 1,5 m de distância dos limites dos apartamentos e 1,0 m de distância do peitoril da sacada, conforme determina a NBR 10151. A Fig. 4.10 mostra um desenho esquemático dos pontos das medições nas sacadas do EP25.

Figura 4.10 – Desenho dos pontos das medições nas sacadas



Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.11, mostra a imagem de um dos momentos das medições.

Figura 4.11 - Imagem de um dos momentos das medições



Fonte: Próprio autor

#### 4.1.5.1 Níveis de Pressão Sonora

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na sacada do 3º andar do EP25 no intervalo das 12 às 13 h (primeiro período). A Tab. 4.5 mostra esses resultados em dB nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz, em bandas de oitava, para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5.

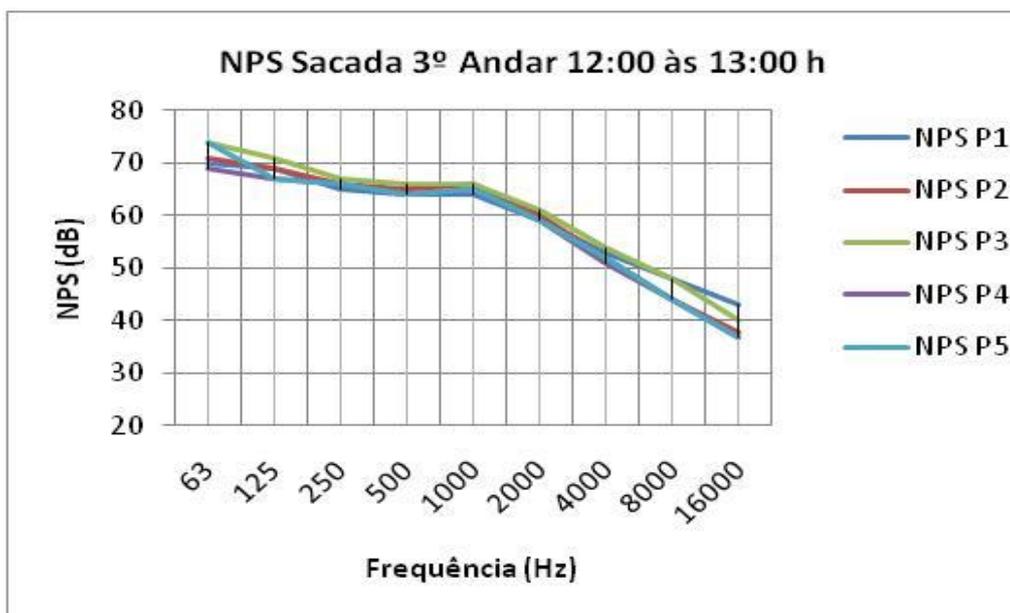
Tabela 4.5 – NPS (dB) na sacada do 3º andar no primeiro período

Freq (Hz)	NPS (dB) P1	NPS (dB) P2	NPS (dB) P3	NPS (dB) P4	NPS (dB) P5
63	70	71	74	69	74
125	69	69	71	67	67
250	65	66	67	66	66
500	64	65	66	64	64
1000	64	66	66	65	65
2000	59	60	61	59	59
4000	53	52	54	51	52
8000	48	44	48	44	44
16000	43	38	40	37	37

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.12 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.5.

Figura 4.12 – Resultados de medição no primeiro período



Fonte: Próprio autor

Os níveis de pressão sonora equivalentes  $L_{Aeq}$  (dBA), obtidos durante o primeiro período de medições no 3º andar estão descritos na Tab. 4.6 a seguir.

Tabela 4.6 –  $L_{Aeq}$  dB(A) 3º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5

Ponto	$L_{Aeq}$ dB(A)
P1	67,4
P2	68,6
P3	69,3
P4	67,5
P5	67,9

Fonte: Próprio autor

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na sacada do 3º andar do EP25 no intervalo das 17 às 18 h (segundo período). A Tab. 4.7 mostra esses resultados em dB nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz, em bandas de oitava, para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5.

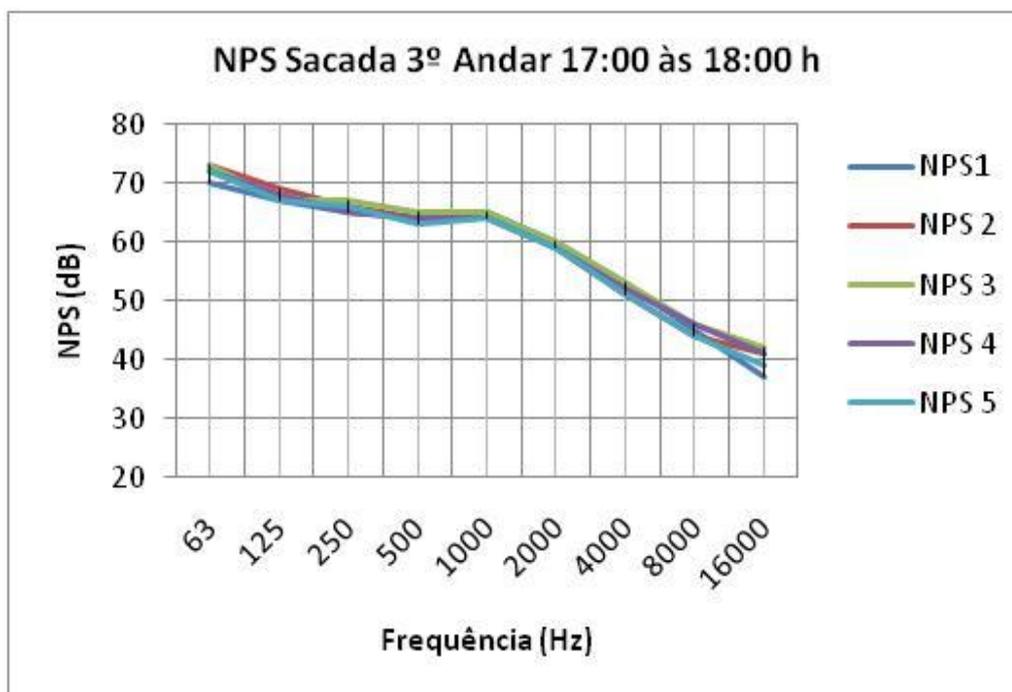
Tabela 4.7 – NPS (dB) na sacada do 3º andar no segundo período

Freq (Hz)	NPS (dB) P1	NPS (dB) P2	NPS (dB) P3	NPS (dB) P4	NPS (dB) P5
63	70	73	73	72	72
125	67	69	67	68	67
250	65	66	67	65	66
500	64	64	65	64	63
1000	65	65	65	64	64
2000	60	59	60	59	59
4000	53	51	53	52	51
8000	45	44	46	46	44
16000	37	41	42	41	39

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.13 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.7.

Figura 4.13 – Resultados de medição no segundo período



Fonte: Próprio autor

Os níveis equivalentes  $L_{Aeq}$  (dBA) obtidos durante o segundo período de medições no 3º andar estão na Tab. 4.8.

Tabela 4.8 –  $L_{Aeq}$  (dBA) 3º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5

Ponto	$L_{Aeq}$ dB(A)
P1	68,1
P2	67,8
P3	68,4
P4	67,5
P5	67,1

Fonte: Próprio autor

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na sacada do 13º andar do EP25, no intervalo das 12 às 13 h (primeiro período). A Tab. 4.9 mostra esses resultados em dB nas faixas de frequência de 63 Hz à 16 kHz, em bandas de oitava, para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5.

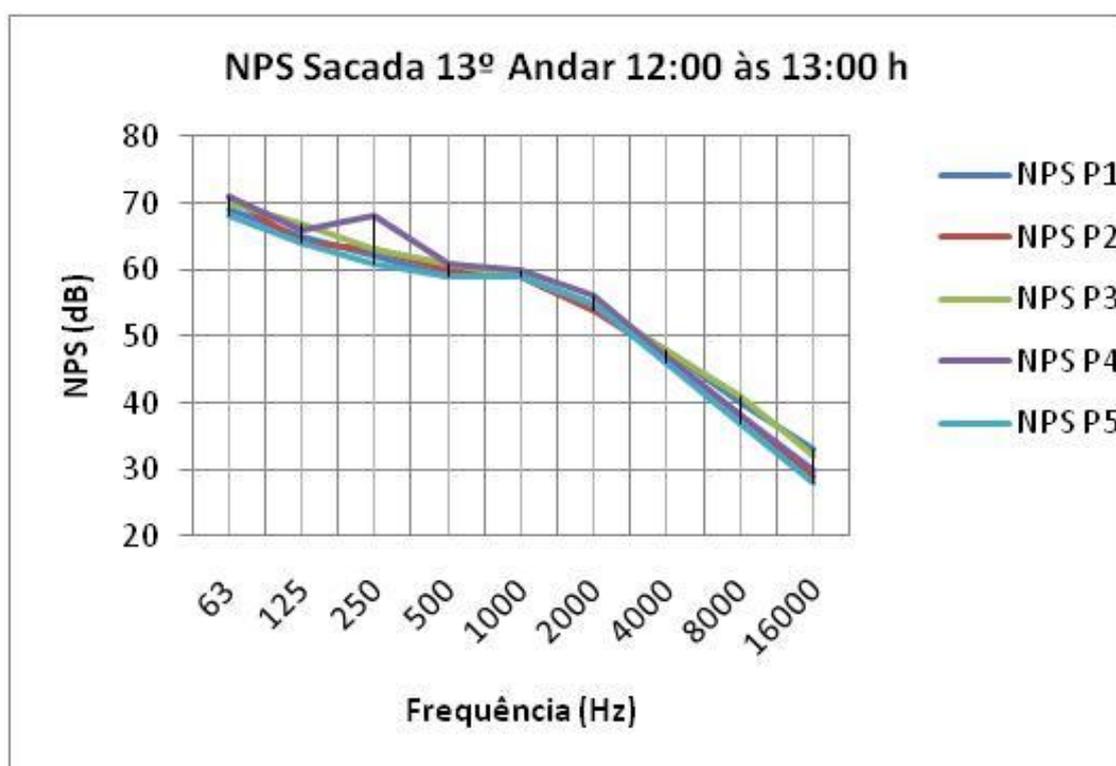
Tabela 4.9 – NPS (dB) na sacada do 13º andar no primeiro período

Freq (Hz)	NPS (dB) P1	NPS (dB) P2	NPS (dB) P3	NPS (dB) P4	NPS (dB) P5
63	69	71	70	71	68
125	65	64	67	66	64
250	62	63	63	68	61
500	59	60	61	61	59
1000	59	59	59	60	59
2000	54	54	55	56	55
4000	48	47	48	47	46
8000	40	38	41	38	37
16000	33	29	32	30	28

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.14 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.9.

Figura 4.14 – Resultados de medição no primeiro período



Fonte: Próprio autor

Os níveis equivalentes  $L_{Aeq}$  (dBA) obtidos durante o primeiro período de medições no 13º andar estão listados na Tab. 4.10.

Tabela 4.10 –  $L_{Aeq}$  (dBA) 13º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5

Ponto	$L_{Aeq}$ dB(A)
P1	62,5
P2	62,6
P3	63,5
P4	65
P5	62,5

Fonte: Próprio autor

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na sacada do 13º andar do EP25, no intervalo das 17 às 18 h (segundo período).

A Tab. 4.11 mostra esses resultados em dB, nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz, em bandas oitava, para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5.

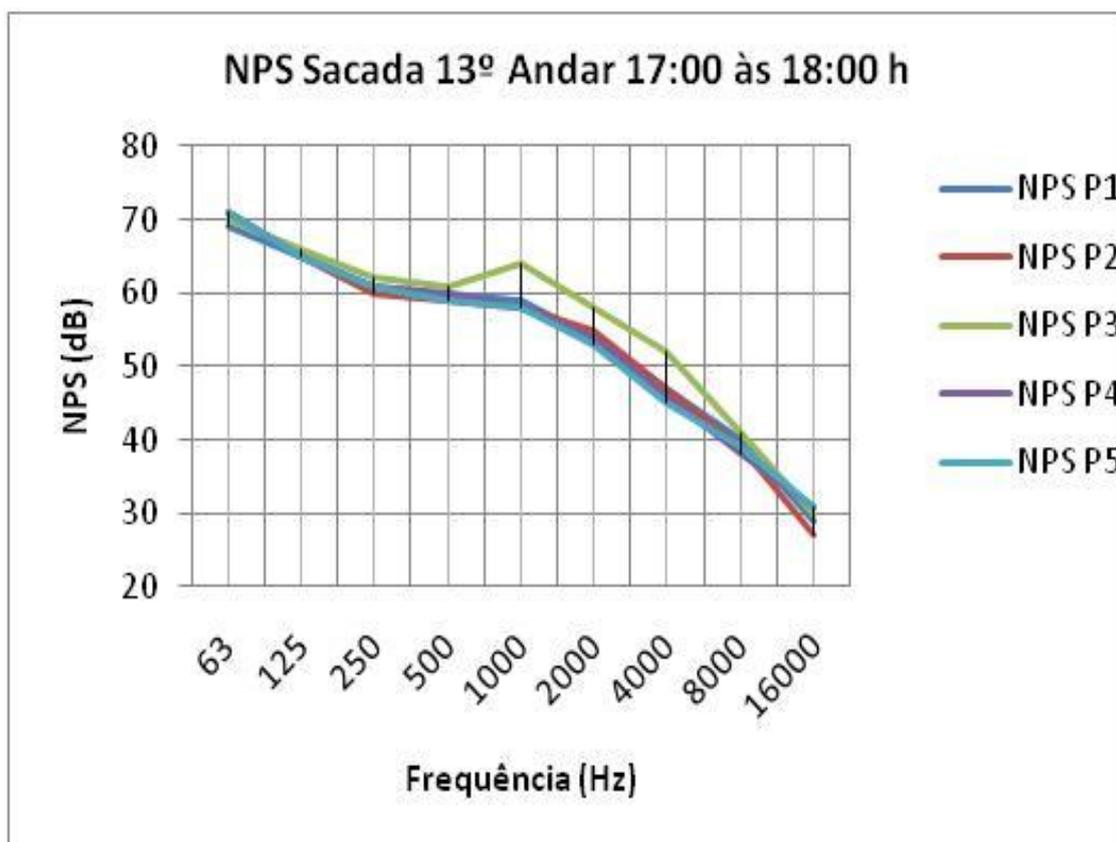
Tabela 4.11 –  $NPS$  (dB) na sacada do 13º andar no segundo período

Freq (Hz)	$NPS$ (dB) P1	$NPS$ (dB) P2	$NPS$ (dB) P3	$NPS$ (dB) P4	$NPS$ (dB) P5
63	69	71	70	71	71
125	65	65	66	65	65
250	61	60	62	61	61
500	60	59	61	60	59
1000	59	58	64	58	58
2000	54	55	58	54	53
4000	47	47	52	46	45
8000	40	39	41	38	39
16000	29	27	30	31	31

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.15 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.11.

Figura 4.15 – Resultados de medição no segundo período



Fonte: Próprio autor

Os níveis equivalentes  $L_{Aeq}$  (dBA) obtidos durante o segundo período de medições no 13º andar estão listados na Tab. 4.12.

Tabela 4.12 –  $L_{Aeq}$  (dBA) 13º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5

Ponto	$L_{Aeq}$ dB(A)
P1	62,6
P2	62,1
P3	63,7
P4	62,5
P5	62

Fonte: Próprio autor

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na sacada do 21º andar do EP25, no intervalo das 12 às 13 h (primeiro período). A Tab. 4.13 mostra esses resultados em dB, nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz, em bandas de oitava, para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5.

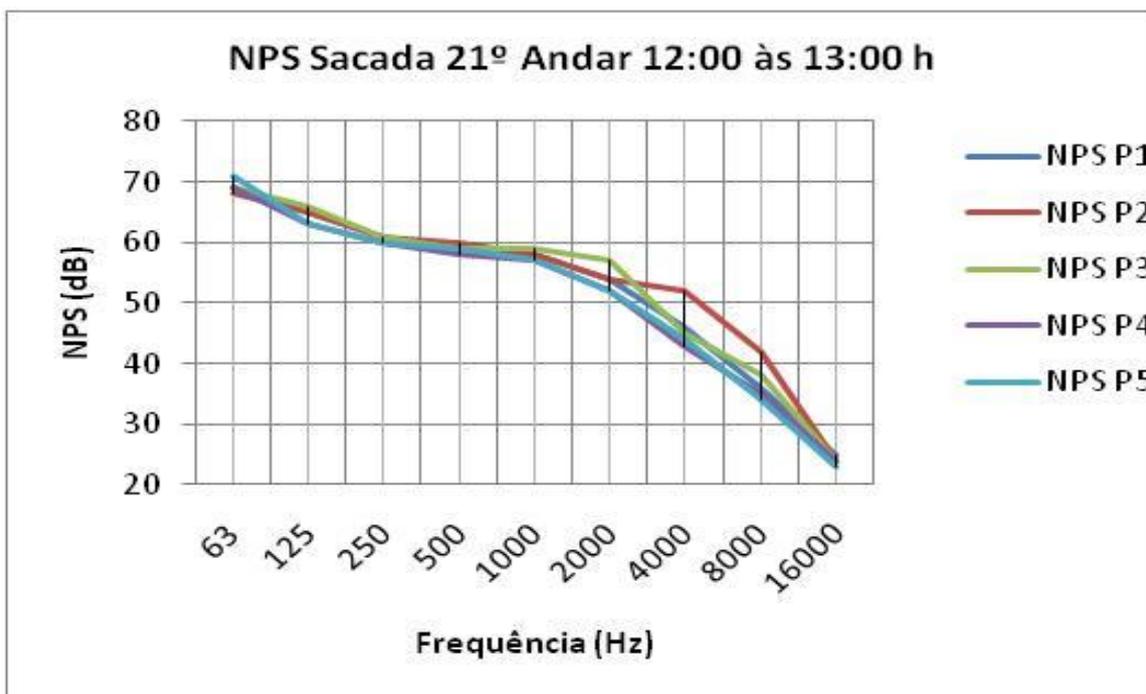
Tabela 4.13 – NPS (dB) na sacada do 21º andar no primeiro período

Freq (Hz)	NPS (dB) P1	NPS (dB) P2	NPS (dB) P3	NPS (dB) P4	NPS (dB) P5
63	69	68	69	69	71
125	65	65	66	63	63
250	61	61	61	60	60
500	59	60	59	58	58
1000	58	58	59	57	57
2000	54	54	57	52	52
4000	46	52	45	43	44
8000	36	42	38	35	34
16000	25	24	34	24	23

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.16 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.13.

Figura 4.16 – Resultados de medição no primeiro período



Fonte: Próprio autor

Os níveis equivalentes  $L_{Aeq}$  (dBA) obtidos durante o primeiro período de medições no 21º andar estão listados na Tab. 4.14.

Tabela 4.14 –  $L_{Aeq}$  (dBA) 21º andar pontos P1, P2, P3, P4 e P5

Ponto	$L_{Aeq}$ dB(A)
P1	62
P2	63
P3	63
P4	60,9
P5	61,1

Fonte: Próprio autor

A seguir, são apresentados os resultados das medições realizadas na sacada do 21º andar do EP25, no intervalo das 17 às 18 h (segundo período). A Tab. 4.15 mostra esses resultados em dB, nas faixas de frequência de 63 Hz a 16 kHz, em bandas de oitava, para os pontos P1, P2, P3, P4 e P5.

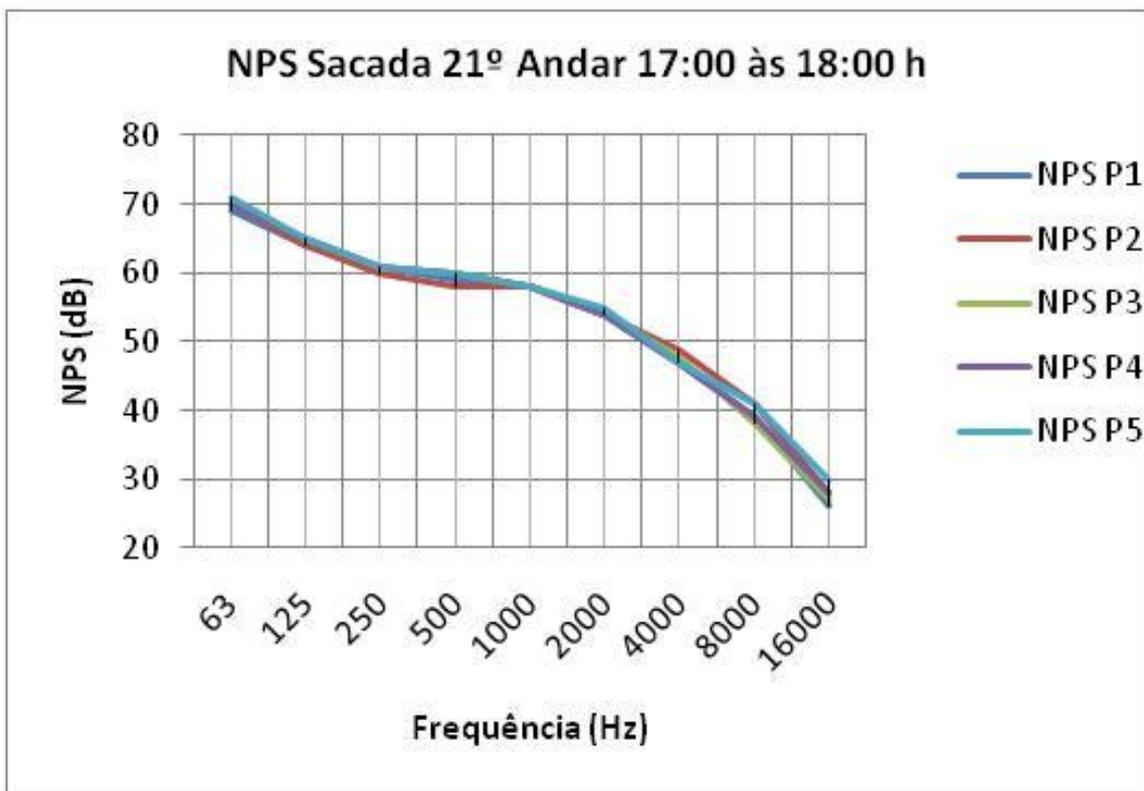
Tabela 4.15 – NPS (dB) na sacada do 21º andar no segundo período

Freq (Hz)	NPS (dB) P1	NPS (dB) P2	NPS (dB) P3	NPS (dB) P4	NPS (dB) P5
63	69	70	70	70	71
125	64	64	65	63	65
250	61	60	61	61	61
500	59	58	60	60	60
1000	58	58	58	58	58
2000	54	54	54	54	55
4000	47	49	48	47	47
8000	39	41	38	39	41
16000	26	28	27	28	30

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.17 mostra o gráfico dos resultados da Tab. 4.15.

Figura 4.17 – Resultados de medição no segundo período



Fonte: Próprio autor

Os níveis equivalentes  $L_{Aeq}$  (dBA) obtidos durante o segundo período de medições no 21º andar estão listados na Tab. 4.16.

Tabela 4.16 –  $L_{Aeq}$  (dBA) 21º andar, pontos P1, P2, P3, P4 e P5

Ponto	$L_{Aeq}$ dB(A)
P1	62
P2	62
P3	62,3
P4	62,1
P5	62,7

Fonte: Próprio autor

#### 4.1.5.2 Interpretação dos Resultados

Nos três andares estudados do EP25, os níveis de pressão sonora por banda de oitava apresentaram diferenças consideráveis com relação às elevações desses andares, ou seja, há diminuição no *NPS* nos andares superiores. Por exemplo:

- Nas bandas de frequência de 125 e 250 Hz, a diferença do *NPS* do 3º para o 13º andar foi de aproximadamente 3 dB de atenuação nos dois períodos.
- Nas mesmas bandas de frequência, a diferença de *NPS* do 3º para o 21º andar passa para aproximadamente 4 dB de atenuação nos dois períodos.
- Nas bandas de frequência de 500 Hz a 4 kHz, a diferença do *NPS* do 3º para o 13º andar foi de aproximadamente 5 dB de atenuação nos dois períodos.
- Nas mesmas bandas de frequência, a diferença de *NPS* do 3º para o 21º andar passa para aproximadamente 6 dB de atenuação nos dois períodos.
- Nas bandas de frequência de 8 a 16 kHz, a diferença do *NPS* do 3º para o 13º andar foi de aproximadamente 8 dB de atenuação nos dois períodos.
- Nas mesmas bandas de frequência, a diferença do *NPS* do 3º para o 21º andar passa para aproximadamente 9 dB de atenuação nos dois períodos.

Em relação ao  $L_{Aeq}$ , a atenuação é baixa, em torno de 2 dB, considerando as sacadas do 3º andar, em relação à calçada do EP25, nos dois períodos. Já quando se consideram as sacadas do 13º e 21º andares em relação à mesma calçada e nos mesmos períodos, essa atenuação passa para 6 dB e 8 dB, respectivamente.

O resultado das medições de *NPS* para os andares superiores mostram uma tendência de atenuação do ruído em relação à elevação dos andares no EP25.

A Tab 4.17 mostra os valores de  $L_{Aeq}$  para os três andares em questão e respectivos períodos considerados.

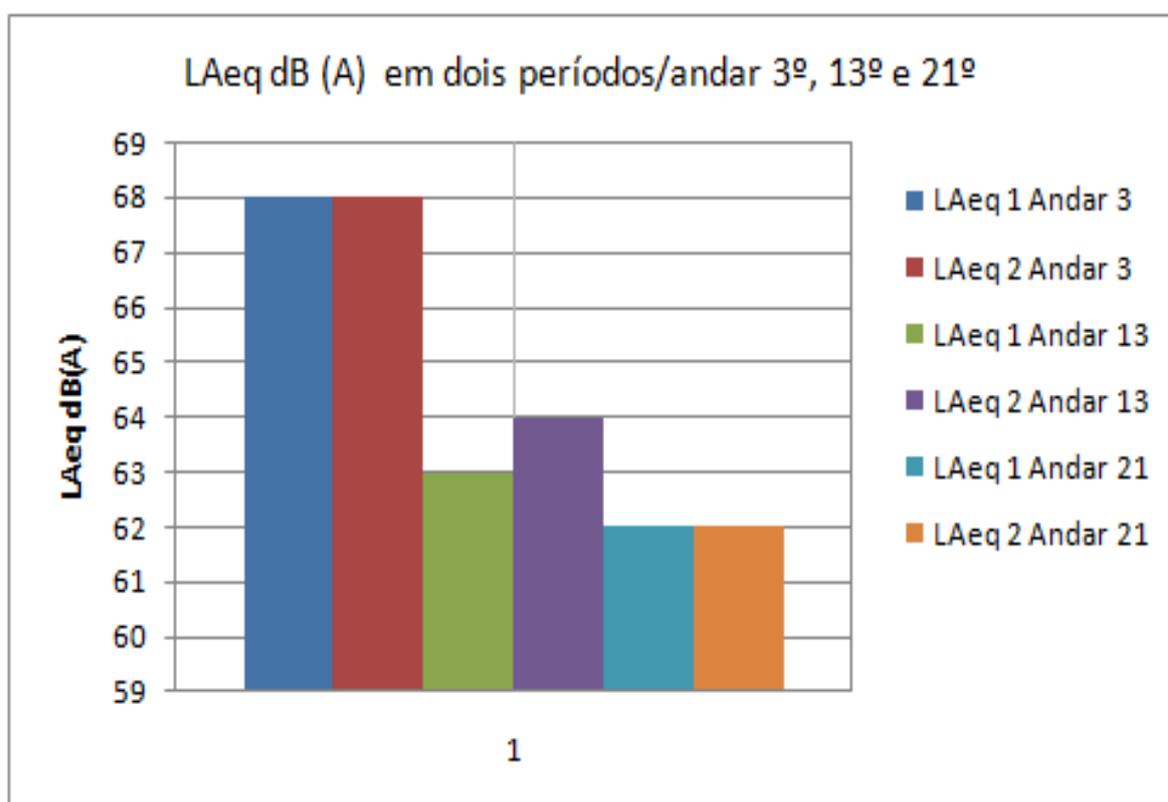
Tabela 4.17 – Valores de  $L_{Aeq}$  para o 3º, 13º e 21º andares do EP25

L <sub>Aeq</sub> 1 Andar 3	L <sub>Aeq</sub> 2 Andar 3	L <sub>Aeq</sub> 1 Andar 13	L <sub>Aeq</sub> 2 Andar 13	L <sub>Aeq</sub> 1 Andar 21	L <sub>Aeq</sub> 2 Andar 21
<b>68 dB (A)</b>	68 dB (A)	63 dB (A)	64 dB (A)	62 dB (A)	62 dB (A)

Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.18 mostra o gráfico de atenuação em função da elevação dos andares do EP25.

Figura 4.18 – Gráfico de atenuação em função da elevação do EP25

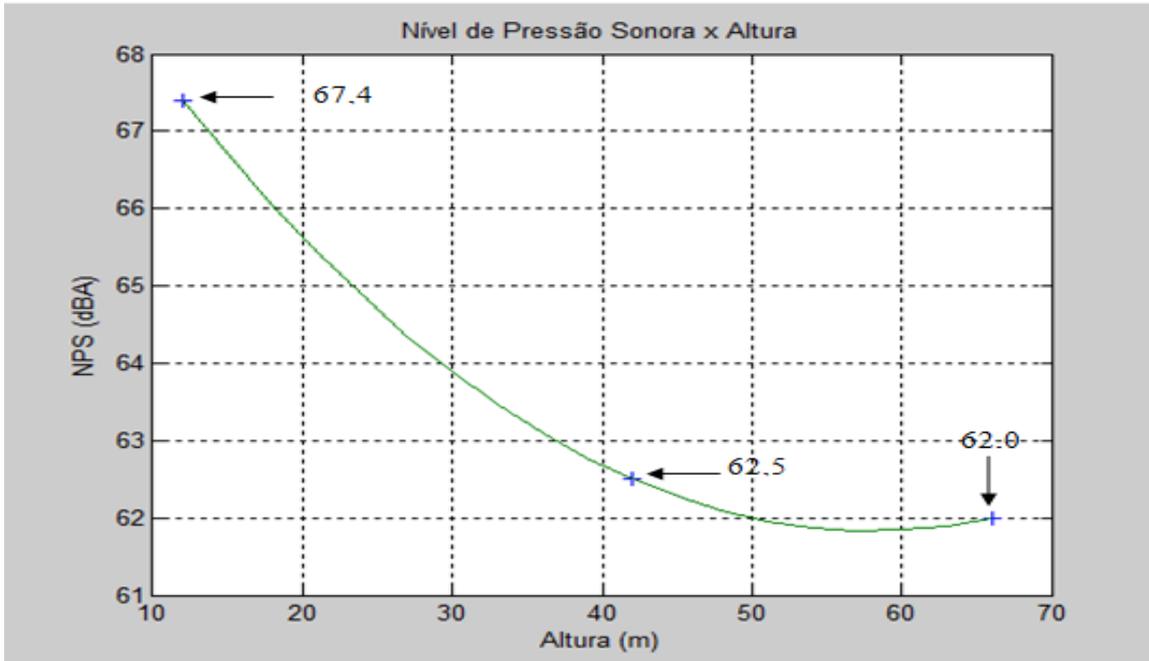


Fonte: Próprio autor

Com o uso de um polinômio de grau 2, programado no MATLAB, foi possível ajustar as curvas de tendências dos resultados experimentais dos pontos P1, P2, P3, P4 e P5, para todos os andares a partir do 3º até o 21º. Assim, foi possível projetar uma curva de decaimento do NPS, em função da elevação da altura do prédio seguindo a rotina programada no MATLAB, apresentada no Apêndice 1.

A Fig. 4.19, apresenta os resultados do ponto P1 do 3º ao 21º andar com a curva de tendência ajustada no MATLAB.

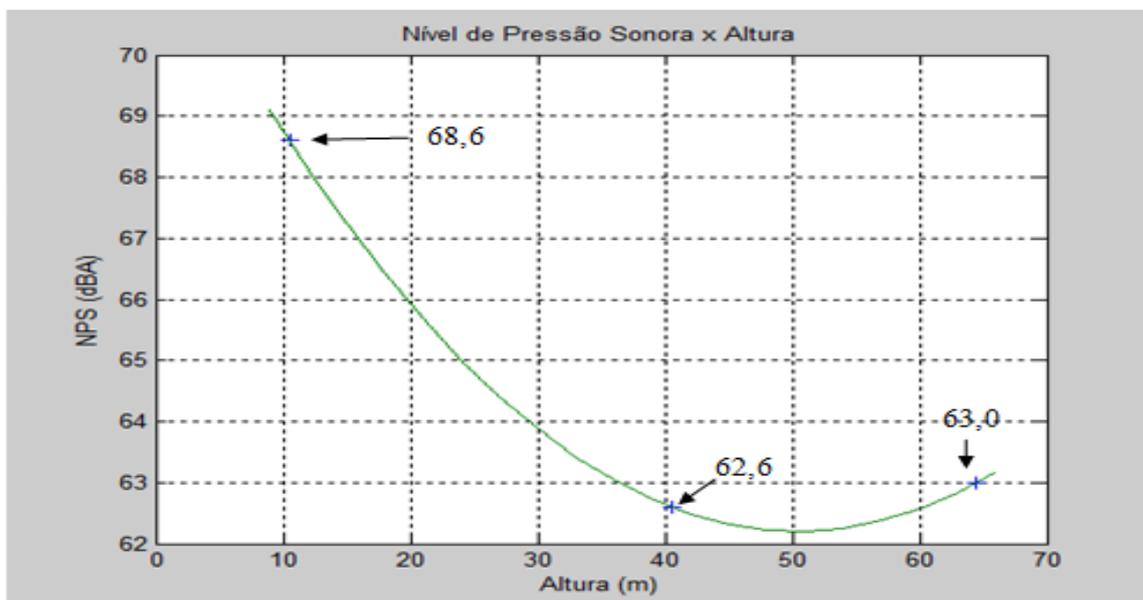
Figura 4.19 – Curva de tendência para o ponto P1 do 3º ao 21º andar



Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.20, apresenta os resultados do ponto P2 do 3º ao 21º andar com a curva de tendência ajustada no MATLAB.

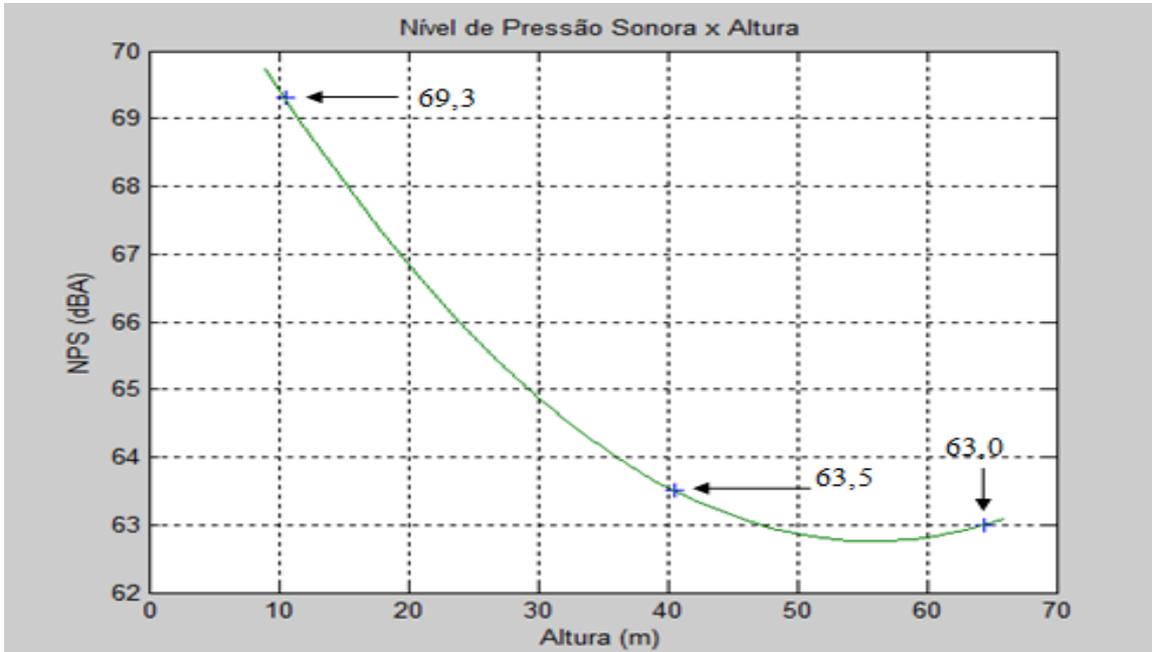
Figura 4.20 – Curva de tendência para o ponto P2 do 3º ao 21º andar



Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.21, apresenta os resultados do ponto P3 do 3º ao 21º andar com a curva de tendência ajustada no MATLAB.

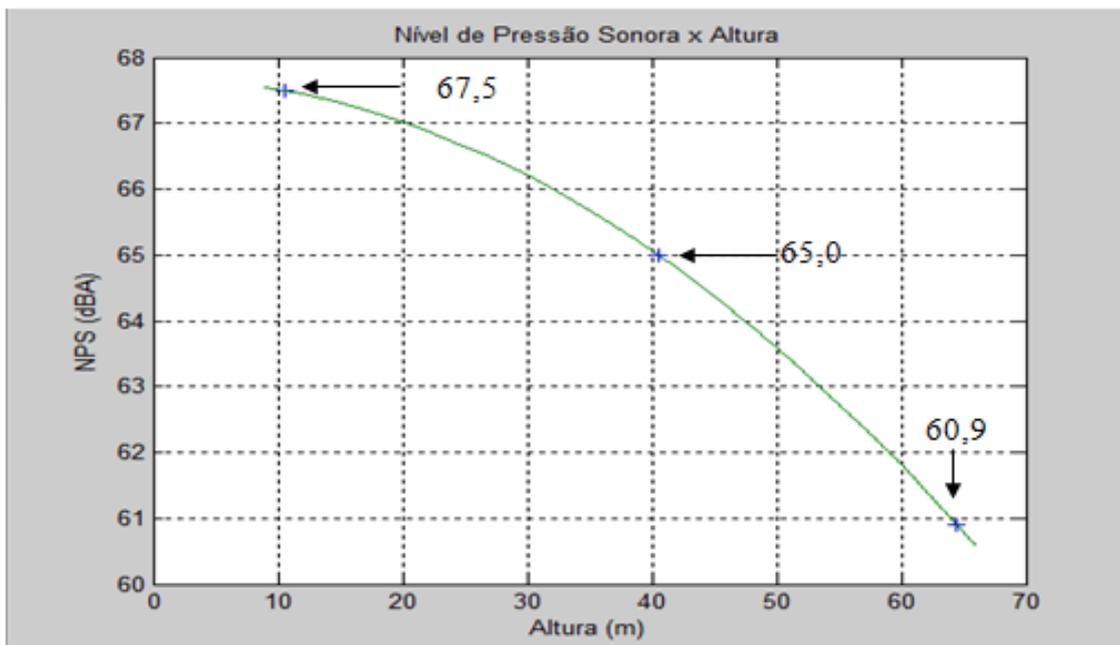
Figura 4.21 – Curva de tendência para o ponto P3 do 3º ao 21º andar



Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.22, apresenta os resultados do ponto P4 do 3º ao 21º andar com a curva de tendência ajustada no MATLAB.

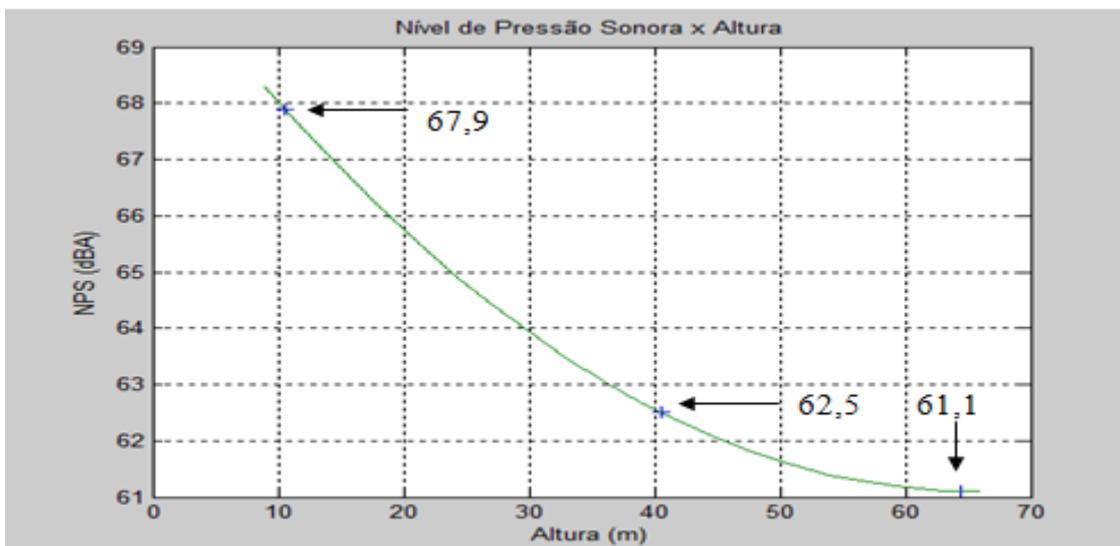
Figura 4.22 – Curva de tendência para o ponto P4 do 3º ao 21º andar



Fonte: Próprio autor

A Fig. 4.23, apresenta os resultados do ponto P5 do 3º ao 21º andar com a curva de tendência ajustada no MATLAB.

Figura 4.23 – Curva de tendência para o ponto P5 do 3º ao 21º andar



Fonte: Próprio autor

## 4.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados com detalhes os procedimentos metodológicos para a realização de medições de *NPS* nas áreas externas e internas ao EP25. Foram apresentados também os resultados dessas medições em forma de tabelas e gráficos, de forma a facilitar seu entendimento e, conseqüentemente, suas interpretações.

A maior dificuldade encontrada para a realização das medições foi a ausência de uma norma brasileira específica sobre o assunto. Assim, os procedimentos de medições seguiram uma compilação de alguns trabalhos de dissertação realizados e normas internacionais, além da norma NBR 10151 e algumas Resoluções que remetem a esta última.

O capítulo 5, seguinte, apresenta os ensaios e resultados de elementos externos de edificações que deverão ser recomendados para compor o tipo de edificação do estudo em questão, já com as soluções e opções de isolamento e tratamento acústico, conforme a aplicação. No mesmo capítulo será mostrado o desenvolvimento aperfeiçoado da mini câmara acústica geminada utilizada nos ensaios.

## CAPÍTULO 5

### 5.1 ELEMENTOS PARA ISOLAÇÃO SONORA

O ruído nas zonas urbanas é um problema grave e crescente, e cerca de 80% desse ruído é devido ao tráfego rodoviário. Segundo a EEA (*The European Environment Agency, 2001*), pelo menos 100 milhões de pessoas na Europa – que vivem em aglomerações ou nas proximidades de infraestruturas de transporte – estão expostas a níveis de ruído de tráfego rodoviário superiores ao nível recomendado pela Organização Mundial de Saúde (OMS), que é de 55 dB(A). Tal ruído provoca incômodos graves e tem efeitos negativos no sono e na qualidade de vida das pessoas. Portanto, o ruído de tráfego pode ser considerado um dos fatores chave que comprometem a qualidade de vida da população nas grandes cidades.

O aumento real da quantidade de veículos trafegando nas ruas de Belém eleva o ruído de tráfego a níveis que extrapolam os valores recomendados pela OMS. Os resultados de medições apresentadas no capítulo 4 corroboram essa informação.

Neste capítulo, são apresentados os procedimentos e resultados dos ensaios realizados em amostras de elementos externos de edificações, especialmente desenvolvidas para composição das fachadas de edifícios sujeitos ao ruído de tráfego, como contribuição para a mitigação do problema em questão.

São realizadas comparações pertinentes aos materiais comumente usados nas fachadas citadas, de tal forma que haja um claro entendimento sobre as opções de utilização de materiais comuns e os desenvolvidos neste trabalho.

Foram utilizadas três câmaras acústicas para os ensaios dos materiais, a saber: um conjunto de duas mini câmaras geminadas, desenvolvidas no trabalho de Aviz (2006), e uma câmara reverberante desenvolvida no trabalho de Guedes (2007), sendo que um novo conjunto de mini câmaras geminadas foi construído para utilização neste trabalho, aperfeiçoando o conjunto anteriormente desenvolvido por Aviz (2006).

A primeira parte deste capítulo apresenta o aperfeiçoamento da câmara geminada desenvolvida por Aviz (2006), através da construção de duas novas mini câmaras, além do desenvolvimento de partições de vidro para isolamento acústico, utilizando os resultados de medições nas referidas mini câmaras geminadas.

A segunda parte do capítulo apresenta o desenvolvimento de elementos absorvedores, utilizando os resultados de medições na mini câmara reverberante desenvolvida no trabalho de Guedes (2007).

### **5.1.1 Construção das Câmaras Geminadas**

A construção aperfeiçoada do conjunto de duas mini câmaras geminadas seguiu os procedimentos adotados no trabalho de Aviz (2006), com algumas adaptações externas e outras estruturais. Segundo este autor, a construção das mini câmaras geminadas originais seguiu os padrões e normas internacionais, especificamente as normas ISO 140 e ISO 354.

As dimensões das câmaras foram estabelecidas a partir da aplicação de uma escala de 1:6 sobre as dimensões das câmaras da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com algumas adaptações.

A seguir, são apresentadas as etapas de modificações externas e estruturais nas novas mini câmaras geminadas:

- Duplicação da espessura das paredes externas, de tal maneira que o volume interno já desenvolvido, fosse conservado;
- Inserção de material absorvente entre as duas camadas que formam as paredes das câmaras;
- Inserção de borracha neoprene para separação das duas camadas constituintes das paredes;
- Laminação da parte externa das câmaras como acabamento final;
- Inserção, na câmara emissora, de altofalante de 8", 125 watts RMS de potência, com resposta plana na faixa de frequências de 100 Hz a 8 kHz;

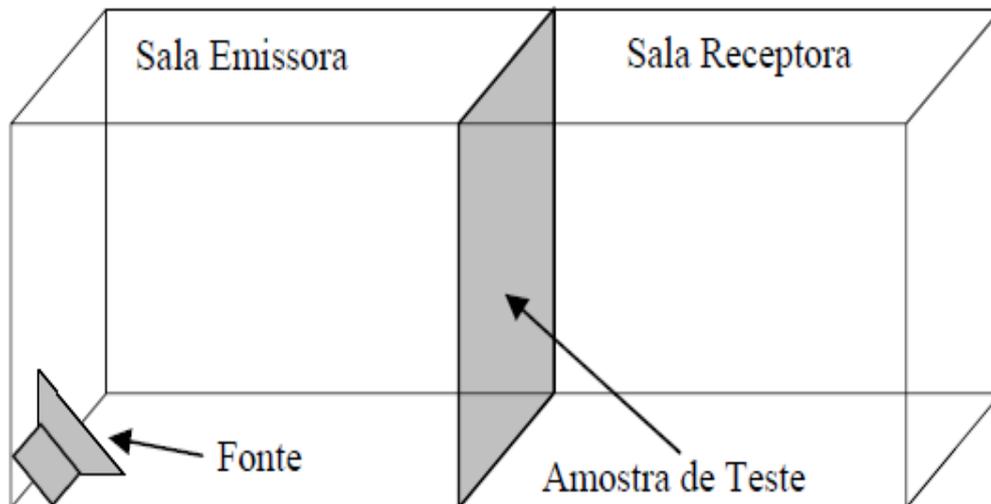
- Aplicação de duas camadas de verniz no interior das mini câmaras, com o objetivo de diminuir a absorção sonora das paredes, principalmente nas frequências acima de 2 kHz;
- Inserção de juntas de acoplamento com vedação em borracha de neoprene para cada câmara;
- Eliminação do visor em vidro nas duas câmaras.

Neste trabalho serão citadas apenas algumas etapas e descritos alguns materiais utilizados na construção do modelo aperfeiçoado do conjunto de mini câmaras, a saber:

- Optou-se pelo uso de lâminas de compensado naval de 18 mm de espessura para a composição de todas as camadas de paredes;
- Respeitando as dimensões internas das mini câmaras originais, construíram-se as duas primeiras caixas retangulares com vedação em prego e cola branca, misturada a pó de serragem.

A Fig. 5.1 mostra um desenho esquemático do conjunto de mini câmaras.

Figura 5.1 – Desenho do conjunto de mini câmaras geminadas



Fonte: Aviz (2006)

- Em seguida, travessas de madeira maciça, para sustentação da segunda camada de paredes, foram pregadas e vedadas, usando a mesma técnica e materiais descritos no processo anterior;

- Cada travessa de madeira foi separada da primeira camada de paredes por borrachas de neoprene de 10 mm de espessura, 40 mm de largura e comprimento variável de acordo com o tamanho de cada travessa, em ambos os lados, de tal forma a impossibilitar o contato direto das travessas de madeira com as paredes de compensado;
- Posteriormente à colocação das travessas de madeira, usou-se lã de rocha de 40 mm e  $112 \text{ kg/m}^3$  de densidade volumétrica, para complementação dos espaços vazios entre as camadas de paredes. Assim, a segunda camada pôde ser pregada e vedada conforme já explicitado;
- O passo seguinte foi a instalação da fonte sonora na mini câmara emissora. Um altofalante da marca *Selenium*, com faixa plana de 100 Hz a 8 kHz, 125 watts de potência *RMS* e diâmetro de 8", segundo dados de catálogo do fabricante, foi fixado em suporte triangular no canto inferior esquerdo da referida mini câmara. As conexões de microfones e altofalante já haviam sido instaladas antes do fechamento da segunda camada, tomando-se o cuidado de vedar cada perfuração com borracha flexível de silicone. A Fig. 5.2 mostra uma imagem frontal da mini câmara emissora;

Figura 5.2 – Fonte sonora instalada na mini câmara emissora



Fonte: Próprio autor

- Finalmente, o conjunto foi laminado em seu exterior, envernizado em seu interior, emborrachado nas extremidades das junções das duas câmaras e calçado com roldanas de mancais de rolamento, revestidas externamente com poliuretano antivibrações.

A Fig. 5.3 mostra o conjunto de mini câmaras geminadas desenvolvidas neste trabalho.

Figura 5.3 – Mini câmaras geminadas com partição inserida entre elas



Fonte: Próprio autor

### 5.1.2 Equipamentos de Medição e Aquisição de Dados

O equipamento utilizado para as medições de tempo de reverberação das câmaras citadas, medição de níveis de absorção sonora dos protótipos desenvolvidos, bem como para medição de perda de transmissão e perda por inserção de outras amostras, foi o Analisador de Sinais Brüel & Kjaer, tipo 3560C (*Pulse*).

O *Pulse* é um sistema de aquisição de dados portátil, com um módulo de controle, que opera as comunicações com o computador, e um módulo de entrada e saída de dados que controla as entradas das medições e fornece o sinal digitalizado para o módulo de controle (CARDOSO, 2010).

O *Pulse*, através do seu módulo de controle, opera as comunicações, via cabo de rede, com o computador, onde está instalado o *software Labshop-view* que, além de controlar o analisador, proporciona ao usuário várias ferramentas para configuração de parâmetros para medições acústicas ou de vibração, visualização e manipulação dos dados adquiridos.

A Fig. 5.4 mostra uma imagem do equipamento descrito.

Figura 5.4 - Conjunto Analisador de sinais de quatro canais Brüel & Kjaer, tipo 3560C – *Pulse*, Amplificador de Potência e *Notebook*



Fonte: Próprio autor

Ao Analisador, foram conectados microfones para medições em campo difuso, já que os ensaios foram realizados em mini câmaras acústicas fechadas. A Fig. 5.5 mostra o tipo de microfone utilizado nos ensaios.

Figura 5.5 - Microfone de campo difuso, Brüel & Kjaer, tipo 4942



Fonte: Próprio autor

### 5.1.3 Ensaios de Perda de Transmissão em Partições de Vidro

Um dos materiais mais usados em fachadas de edifícios é o vidro. Esse material, geralmente, está acoplado a uma esquadria de suporte nas portas e janelas e até em peitoris de sacadas, formando o conjunto de elementos externos dessas edificações.

Normalmente, tal conjunto de elementos é usado apenas como elemento estético e de proteção contra intempéries nos projetos de fachadas dessas edificações.

Negligenciar o isolamento acústico na concepção de projetos de fachadas de edificações, principalmente as fachadas frontais às ruas e avenidas de grande fluxo de veículos, geralmente causa constantes transtornos aos seus futuros usuários, devido ao excesso de ruído exterior que penetra no interior desses ambientes. E, normalmente, o problema do ruído é detectado pelos usuários somente após a fase de instalação de moradia. Nesse caso, as soluções corretivas de atenuação desses ruídos externos tornam-se caras e, na maioria das vezes, inviáveis a esses usuários.

Portanto, esta primeira parte do capítulo mostrará os resultados do desenvolvimento de partições de vidros duplos e triplos, a partir de ensaios realizados nas mini câmaras geminadas, com a finalidade de atenuar o problema da penetração de ruído de tráfego no interior de edificações. Essas partições, quando acopladas aos seus suportes (geralmente, esquadrias de alumínio), devem manter as mesmas características estéticas e de proteção contra as intempéries já citadas, porém, com a vantagem de possuir grande isolamento acústico, além de custo de confecção e instalação viáveis em todos os aspectos de projeto.

A Fig. 5.6 mostra uma partição posicionada entre as câmaras, pronta para os ensaios.

Figura 5.6 – Partição de vidro triplo entre as câmaras geminadas



Fonte: Próprio autor

As partições de vidros duplos e triplos ensaiadas possuem as seguintes configurações:

- **Partição 1** – Duas lâminas de vidro comum de 4 mm de espessura, separadas por espaçador de alumínio de 9 mm de largura, 9 mm de altura e comprimento variável em função do comprimento da partição. Os espaçadores têm seu interior vazio preenchido com sílica sólida, formando, assim, uma câmara de ar desidratada, cuja finalidade é a de evitar a condensação entre os vidros do conjunto, por diferença de temperaturas. Esses espaçadores foram colados às lâminas de vidro com cola UV (cola com secagem por exposição a raios ultravioleta), rigorosamente, em todas as extremidades de contato.

- **Partição 2** – Duas lâminas de vidro comum de 6 mm de espessura, separadas por espaçador de alumínio de 9 mm de largura, 9 mm de altura e comprimento variável, em função do comprimento da partição. Como antes, os espaçadores têm seu interior vazio preenchido com sílica sólida.
- **Partição 3** – Duas lâminas de vidros laminados de 4 mm e 6 mm de espessura e uma lâmina de vidro comum com espessura de 4 mm, separadas por espaçador de alumínio de 9 mm de largura, 9 mm de altura e comprimento variável em função do comprimento da partição.

A Fig. 5.7 mostra uma partição de vidro triplo com detalhes.

Figura 5.7 – Partição de vidros triplos em detalhes



Fonte: Próprio autor

#### 5.1.4 Ensaio dos Níveis de Ruído de Fundo nas Câmaras Geminadas com Inserções das Partições 1 e 3

Em princípio, foi necessário medir o nível de ruído de fundo nas mini câmaras, com o intuito de verificar valores compatíveis com uma boa relação sinal/ruído, ou seja, uma diferença acima de 15 dB entre o ruído de fundo nas mini câmaras e o ruído gerado para os ensaios.

Para isso, foram inseridas duas partições de vidro entre as mini câmaras, a primeira de vidros duplos e a segunda de vidros triplos. Assim, puderam-se medir os níveis de ruído de fundo nas duas câmaras, seguindo a norma ISO 140. Segundo essa norma, para cada posição de microfone, o tempo mínimo de medição deve ser de seis segundos. Os pontos de cada posição de microfone determinado e suas respectivas distâncias dentro das câmaras estão mostrados na Tab. 5.1.

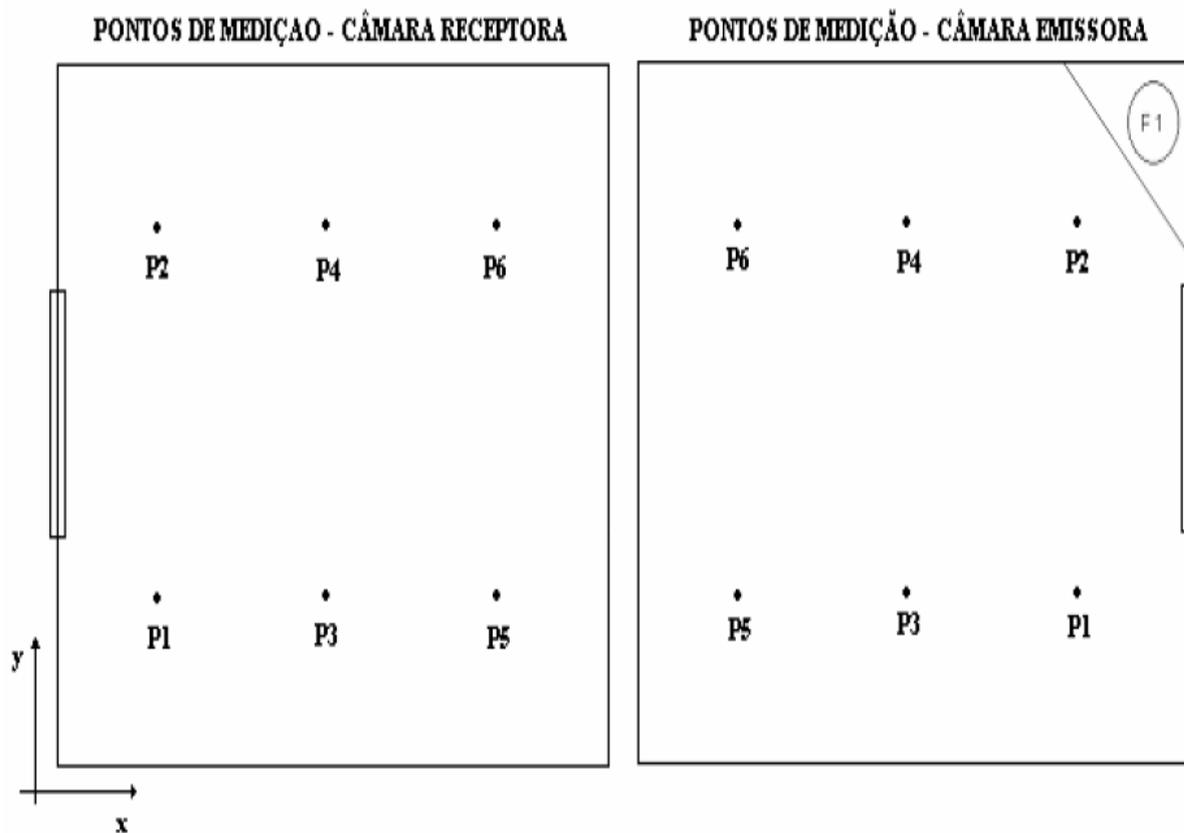
Tabela 5.1 – Coordenadas dos pontos de medição e localização dos microfones

<b>Ponto</b>	<b>Dimensão x (m)</b>	<b>Dimensão y (m)</b>
<b>P1</b>	0,17	0,21
<b>P2</b>	0,17	0,46
<b>P3</b>	0,40	0,21
<b>P4</b>	0,40	0,46
<b>P5</b>	0,63	0,21
<b>P6</b>	0,63	0,46

Fonte: Aviz (2006)

A Fig. 5.8 mostra o desenho esquemático dos pontos de medição nas mini câmaras.

Figura 5.8 – Representação dos pontos de medição nas mini câmaras



Fonte: Aviz 2006

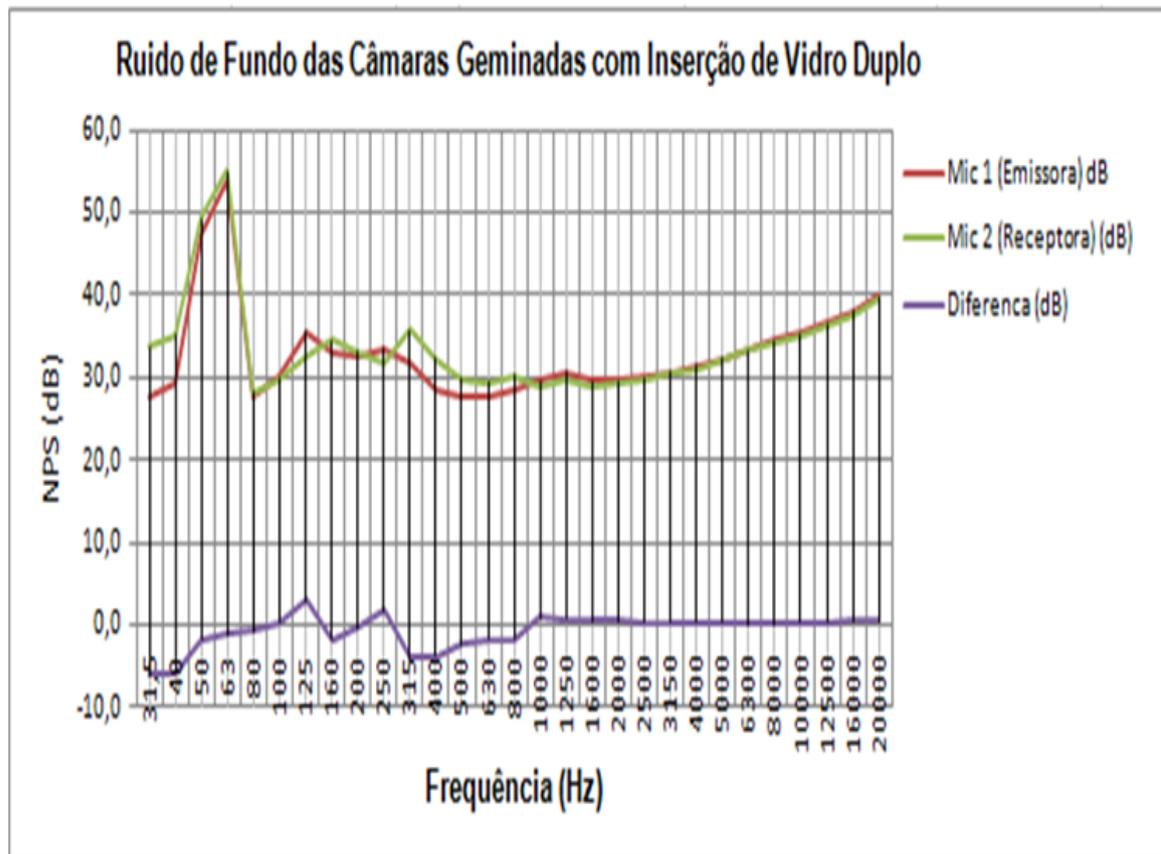
As câmaras geminadas, emissora e receptora, apresentaram os resultados médios de ruído de fundo mostrados na Tab. 5.2 e Fig. 5.9, quando se inseriu a partição 1, de vidros duplos 4-9-4, entre elas.

Tabela 5.2 – Resultado das medições de ruído de fundo com vidros duplos

Freq (Hz)	Mic 1 (Emissora) (dB)	Mic 2 (Receptora) (dB)	Diferença (dB)
31.5	27,5	33,7	-6,2
40	29,2	35,1	-5,9
50	47,4	49,2	-1,8
63	53,8	55,0	-1,2
80	27,5	28,3	-0,8
100	30,0	29,7	0,3
125	35,5	32,6	2,9
160	32,8	34,6	-1,8
200	32,7	33,1	-0,4
250	33,4	31,7	1,7
315	31,8	35,7	-4,0
400	28,5	32,4	-3,9
500	27,5	29,9	-2,4
630	27,6	29,3	-1,7
800	28,4	30,1	-1,7
1000	29,7	28,8	0,8
1250	30,5	29,9	0,6
1600	29,5	29,0	0,5
2000	29,7	29,3	0,4
2500	30,0	29,8	0,2
3150	30,7	30,4	0,3
4000	31,4	31,1	0,3
5000	32,3	32,1	0,2
6300	33,3	33,2	0,0
8000	34,4	34,4	0,0
10000	35,4	35,1	0,3
12500	36,6	36,3	0,3
16000	38,1	37,7	0,4
20000	39,8	39,4	0,4

Fonte: Próprio autor

Figura 5.9 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.2



Fonte: Próprio autor

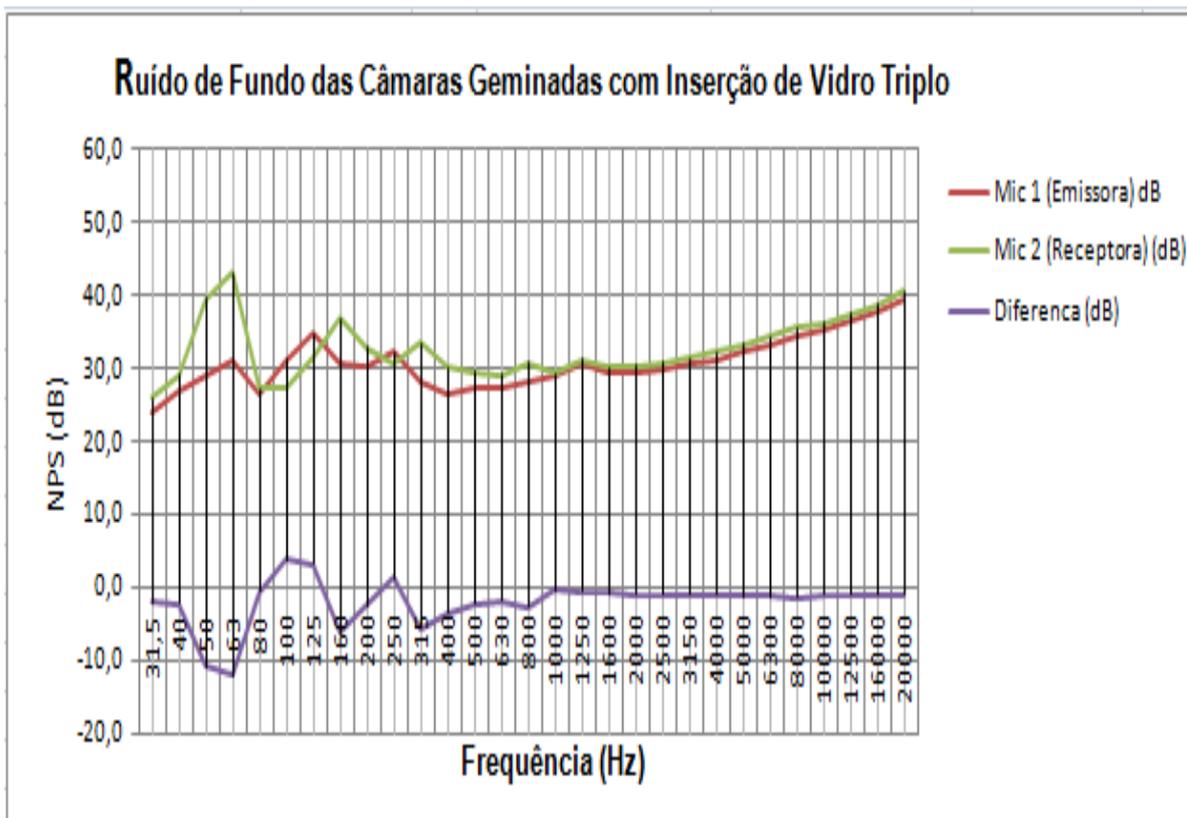
As câmaras geminadas, emissora e receptora, apresentaram os resultados médios de ruído de fundo mostrados na Tab. 5.3 e Fig. 5.10, quando se inseriu a partição 3, de vidros triplos 4,6-9-6, entre elas.

Tabela 5.3 – Resultado das medições de ruído de fundo com vidros triplos

Freq (Hz)	Mic 1 (Emissora) (dB)	Mic 2 (Receptora) (dB)	Diferença (dB)
31.5	24,2	26,1	-1,9
40	27,0	29,1	-2,1
50	28,9	39,6	-10,7
63	31,1	43,2	-12,0
80	26,6	27,2	-0,5
100	31,3	27,5	3,8
125	34,7	31,5	3,2
160	30,5	36,8	-6,3
200	30,5	33,0	-2,5
250	32,3	30,9	1,4
315	28,1	33,6	-5,5
400	26,7	30,3	-3,5
500	27,2	29,5	-2,2
630	27,3	29,1	-1,7
800	28,1	30,8	-2,7
1000	29,0	29,4	-0,4
1250	30,8	31,3	-0,5
1600	29,4	30,1	-0,7
2000	29,5	30,3	-0,9
2500	29,7	30,7	-1,0
3150	30,6	31,5	-0,9
4000	31,2	32,2	-1,0
5000	32,2	33,2	-1,1
6300	33,2	34,4	-1,2
8000	34,3	35,6	-1,3
10000	35,2	36,2	-1,0
12500	36,4	37,4	-1,0
16000	37,9	38,8	-0,9

Fonte: Próprio autor

Figura 5.10 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.3



Fonte: Próprio autor

### 5.1.5 Ensaio de Diferenças de Níveis nas Câmaras Geminadas com a Inserção das Partições 1, 2 e 3

Seguindo os mesmos procedimentos adotados no trabalho de Aviz (2006), as partições de vidro puderam ser ensaiadas nas mini câmaras. As dimensões dessas partições foram determinadas pelas dimensões de abertura das duas câmaras, conforme parte 1 da norma ISO 140.

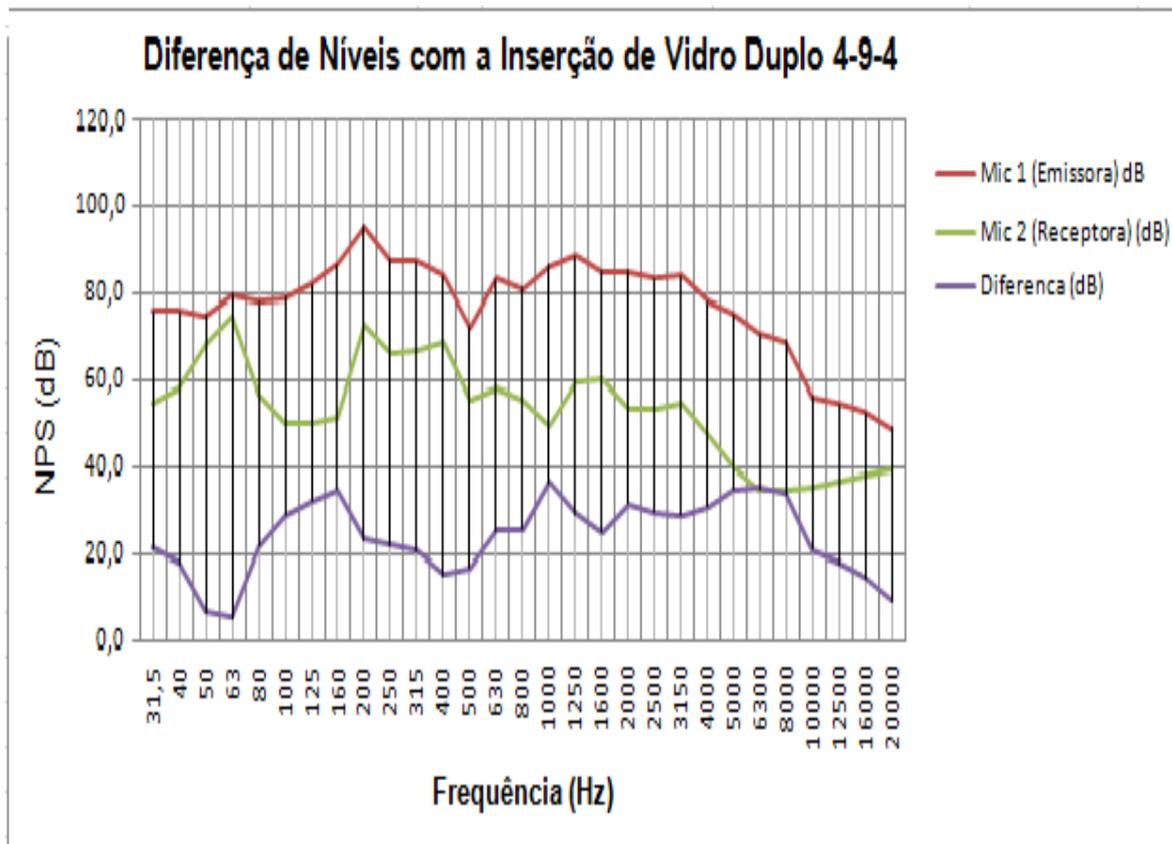
Assim, as câmaras geminadas, emissora e receptora, apresentaram os resultados de diferença de *NPS*, mostrados na Tab. 5.4 e Fig. 5.11, quando se inseriu a partição 1, de vidros comuns duplos 4-9-4, entre elas.

Tabela 5.4 – Medição de diferença de *NPS* nas câmaras geminadas, com vidros duplos 4-9-4

Freq (Hz)	Mic 1 (Emissora) (dB)	Mic 2 (Receptora) (dB)	Diferença (dB)
31.5	76,1	54,9	21,2
40	76,0	58,1	17,9
50	75,0	68,4	6,6
63	79,7	74,6	5,1
80	78,2	56,7	21,5
100	79,0	50,1	28,8
125	82,3	50,0	32,2
160	86,6	51,8	34,8
200	95,8	72,6	23,2
250	87,7	65,9	21,9
315	87,5	67,0	20,6
400	84,0	68,9	15,2
500	72,5	55,6	16,9
630	83,6	58,4	25,2
800	81,1	55,5	25,7
1000	86,3	49,8	36,5
1250	88,7	59,4	29,3
1600	85,1	60,1	25,0
2000	85,0	53,3	31,7
2500	83,6	53,8	29,8
3150	84,1	55,0	29,1
4000	78,3	47,3	30,9
5000	75,4	40,3	35,1
6300	70,7	35,1	35,6
8000	69,0	34,9	34,1
10000	56,4	35,4	21,0
12500	54,6	36,5	18,0
16000	52,5	37,8	14,7
20000	48,9	39,5	9,3

Fonte: Próprio autor

Figura 5.11 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.4



Fonte: Próprio autor

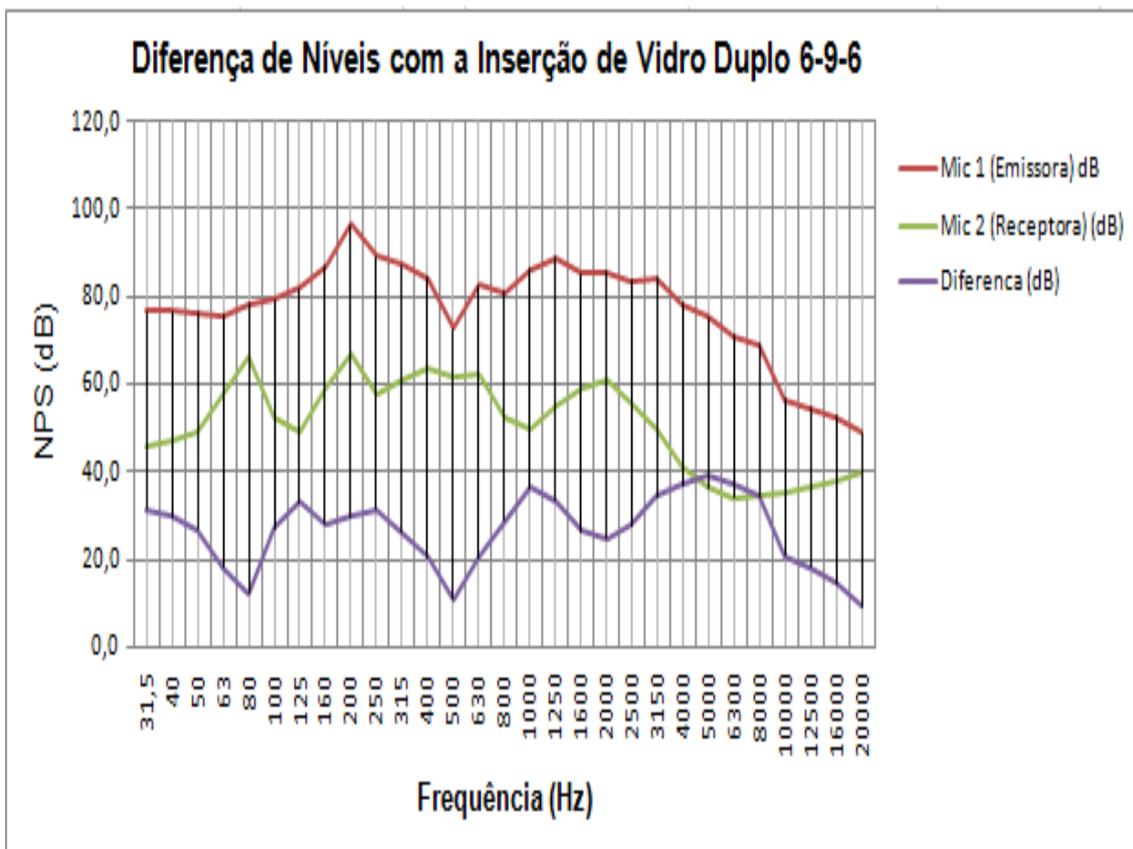
As câmaras geminadas, emissora e receptora apresentaram os resultados de diferença de *NPS* mostrados na Tab. 5.5 e Fig. 5.12, quando se inseriu a partição 2, de vidros comuns duplos 6-9-6, entre elas.

Tabela 5.5 – Medição de diferença de *NPS* nas câmaras geminadas, com vidros duplos 6-9-6

Freq (Hz)	Mic 1 (Emissora) (dB)	Mic 2 (Receptora) (dB)	Diferença (dB)
31.5	76,7	45,5	31,3
40	76,8	47,0	29,8
50	76,2	49,3	26,9
63	75,7	57,4	18,3
80	78,4	66,2	12,2
100	79,3	52,1	27,2
125	81,9	48,9	33,0
160	86,9	58,8	28,1
200	96,4	66,7	29,7
250	89,2	57,9	31,3
315	87,2	61,2	26,0
400	84,3	63,8	20,6
500	72,5	61,6	11,0
630	82,6	62,0	20,6
800	80,9	52,1	28,9
1000	86,3	49,8	36,4
1250	88,7	55,3	33,5
1600	85,1	58,8	26,4
2000	85,4	60,8	24,7
2500	83,6	55,9	27,8
3150	84,1	49,9	34,2
4000	78,4	41,4	37,0
5000	75,5	36,5	39,0
6300	70,9	34,0	36,9
8000	68,9	34,7	34,2
10000	56,4	35,4	21,0
12500	54,7	36,6	18,1
16000	52,4	37,9	14,6
20000	48,8	39,5	9,3

Fonte: Próprio autor

Figura 5.12 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.5



Fonte: Próprio autor

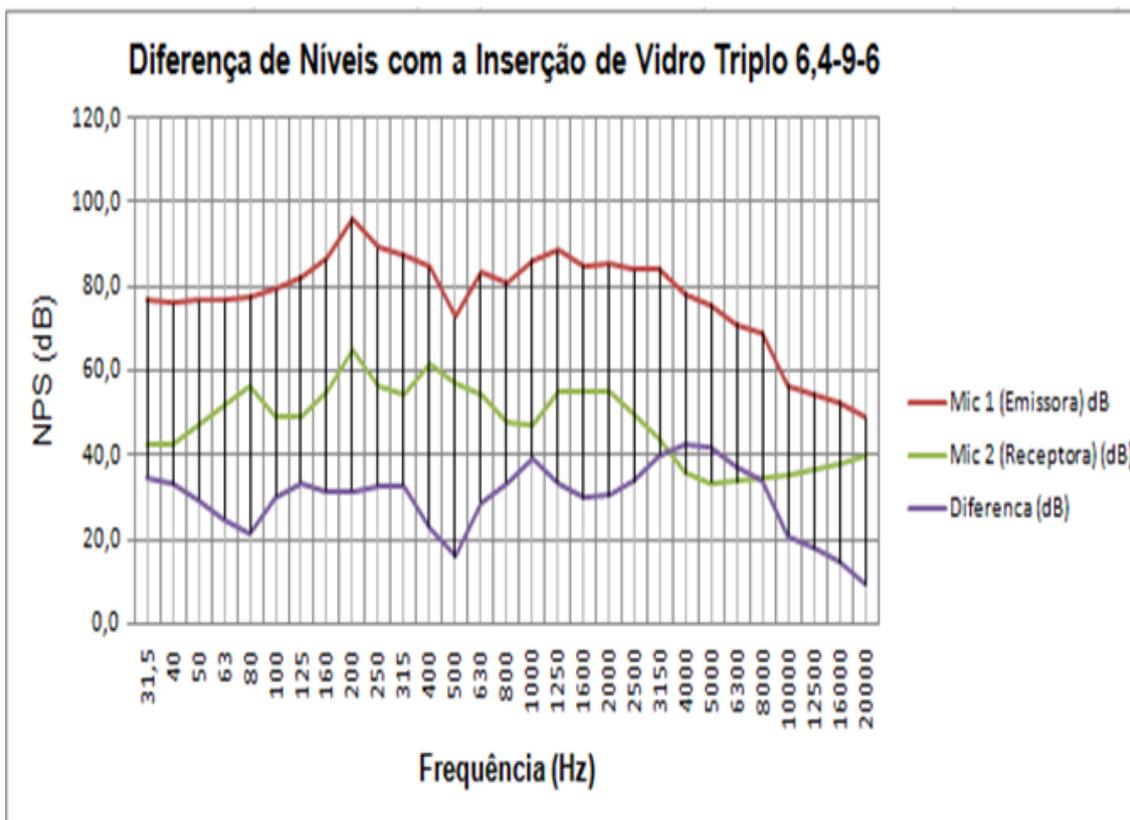
As câmaras geminadas, emissora e receptora apresentaram os resultados de diferença de *NPS* mostrados na Tab. 5.6 e Fig. 5.13, quando se inseriu a partição 3, de vidros laminados triplos 6,4-9-6, entre elas.

Tabela 5.6 – Medição de diferença de *NPS* nas câmaras geminadas, com vidros triplos 6,4-9-6

Freq (Hz)	Mic 1 (Emissora) (dB)	Mic 2 (Receptora) (dB)	Diferença (dB)
31,5	76,9	42,4	34,6
40,0	75,9	42,7	33,2
50,0	76,7	47,3	29,4
63,0	76,7	51,8	24,9
80,0	77,7	56,0	21,7
100,0	79,2	48,9	30,2
125,0	82,2	48,9	33,3
160,0	86,5	55,1	31,4
200,0	96,3	64,9	31,4
250,0	89,0	56,3	32,8
315,0	87,5	54,7	32,8
400,0	84,5	61,6	22,9
500,0	72,8	56,9	15,9
630,0	83,3	54,4	28,9
800,0	80,8	47,5	33,3
1000,0	86,3	47,2	39,2
1250,0	88,5	55,1	33,4
1600,0	84,9	55,2	29,7
2000,0	85,2	54,8	30,4
2500,0	83,8	50,0	33,8
3150,0	84,1	44,1	40,0
4000,0	78,4	35,7	42,8
5000,0	75,5	33,4	42,1
6300,0	70,9	33,8	37,1
8000,0	68,9	34,8	34,2
10000,0	56,4	35,4	20,9
12500,0	54,5	36,5	18,0
16000,0	52,5	37,8	14,7
20000,0	48,8	39,5	9,3

Fonte: Próprio autor

Figura 5.13 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.6



Fonte: Próprio autor

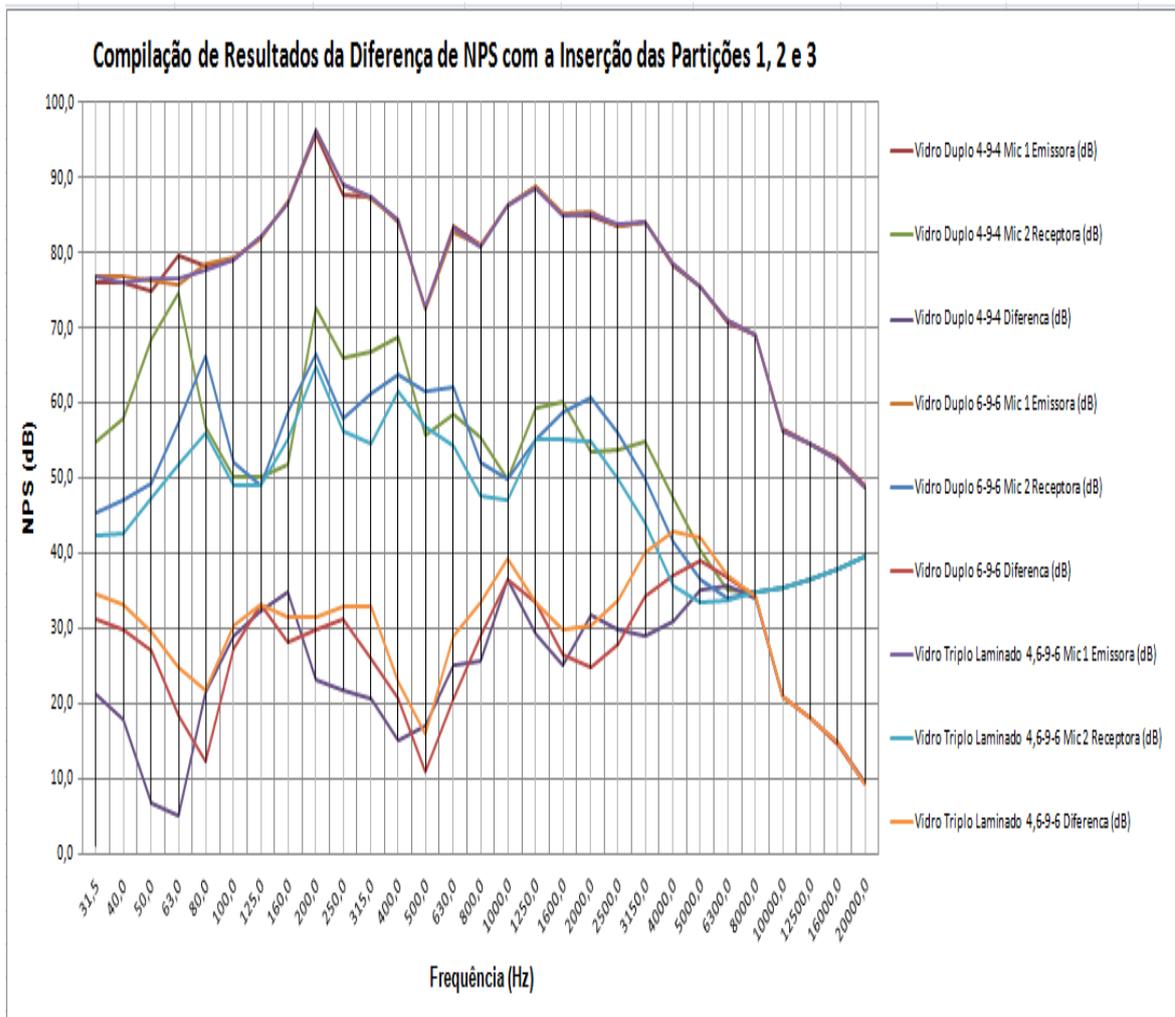
A Tab. 5.7, a seguir, mostra uma compilação dos resultados das medições de diferença de *NPS* realizadas nas mini câmaras geminadas, e a Fig. 5.14 apresenta os gráficos dos resultados dessa tabela.

Tabela 5.7 – Compilação de diferenças de NPS, partições 1, 2 e 3, respectivamente

Freq (Hz)	Vidro Duplo 4-9-4			Vidro Duplo 6-9-6			Vidro Triplo Laminado 4,6-9-6		
	Mic 1 Emissora (dB)	Mic 2 Receptora (dB)	Diferença (dB)	Mic 1 Emissora (dB)	Mic 2 Receptora (dB)	Diferença (dB)	Mic 1 Emissora (dB)	Mic 2 Receptora (dB)	Diferença (dB)
31,5	76,1	54,9	21,2	76,7	45,5	31,3	76,9	42,4	34,6
40	76,0	58,1	17,9	76,8	47,0	29,8	75,9	42,7	33,2
50	75,0	68,4	6,6	76,2	49,3	26,9	76,7	47,3	29,4
63	79,7	74,6	5,1	75,7	57,4	18,3	76,7	51,8	24,9
80	78,2	56,7	21,5	78,4	66,2	12,2	77,7	56,0	21,7
100	79,0	50,1	28,8	79,3	52,1	27,2	79,2	48,9	30,2
125	82,3	50,0	32,2	81,9	48,9	33,0	82,2	48,9	33,3
160	86,6	51,8	34,8	86,9	58,8	28,1	86,5	55,1	31,4
200	95,8	72,6	23,2	96,4	66,7	29,7	96,3	64,9	31,4
250	87,7	65,9	21,9	89,2	57,9	31,3	89,0	56,3	32,8
315	87,5	67,0	20,6	87,2	61,2	26,0	87,5	54,7	32,8
400	84,0	68,9	15,2	84,3	63,8	20,6	84,5	61,6	22,9
500	72,5	55,6	16,9	72,5	61,6	11,0	72,8	56,9	15,9
630	83,6	58,4	25,2	82,6	62,0	20,6	83,3	54,4	28,9
800	81,1	55,5	25,7	80,9	52,1	28,9	80,8	47,5	33,3
1000	86,3	49,8	36,5	86,3	49,8	36,4	86,3	47,2	39,2
1250	88,7	59,4	29,3	88,7	55,3	33,5	88,5	55,1	33,4
1600	85,1	60,1	25,0	85,1	58,8	26,4	84,9	55,2	29,7
2000	85,0	53,3	31,7	85,4	60,8	24,7	85,2	54,8	30,4
2500	83,6	53,8	29,8	83,6	55,9	27,8	83,8	50,0	33,8
3150	84,1	55,0	29,1	84,1	49,9	34,2	84,1	44,1	40,0
4000	78,3	47,3	30,9	78,4	41,4	37,0	78,4	35,7	42,8
5000	75,4	40,3	35,1	75,5	36,5	39,0	75,5	33,4	42,1
6300	70,7	35,1	35,6	70,9	34,0	36,9	70,9	33,8	37,1
8000	69,0	34,9	34,1	68,9	34,7	34,2	68,9	34,8	34,2
10000	56,4	35,4	21,0	56,4	35,4	21,0	56,4	35,4	20,9
12500	54,6	36,5	18,0	54,7	36,6	18,1	54,5	36,5	18,0
16000	52,5	37,8	14,7	52,4	37,9	14,6	52,5	37,8	14,7
20000	48,9	39,5	9,3	48,8	39,5	9,3	48,8	39,5	9,3

Fonte: Próprio autor

Figura 5.14 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.7



Fonte: Próprio autor

### 5.1.6 Ensaios do Tempo de Reverberação da Câmara Receptora com a Inserção das Partições 1, 2 e 3

Um dos parâmetros para determinação da perda de transmissão,  $PT$ , proporcionada pela inserção de partições de vidro, é a determinação do tempo de reverberação da sala receptora. Assim, seguiram-se as recomendações da norma ISO 354, a saber:

- As medições devem ser feitas com pelo menos três posições de microfones, distanciadas entre si de, no mínimo, meio comprimento de onda sonora, correspondente à frequência central da banda de interesse;

- Deve ser utilizado um microfone por vez, afastado pelo menos, nesse caso, 0,17 m da partição e das superfícies da câmara, além de 0,33 m de afastamento da fonte sonora.

Portanto, foram realizadas doze medições de tempo de reverberação para cada um dos seis pontos escolhidos das mini câmaras emissora e receptora, com uma posição de fonte. Nesse caso, não foi possível a mudança de posição da fonte, como indica a norma, devido à mesma estar fixa no canto inferior esquerdo da mini câmara emissora. Mesmo usando-se uma fonte externa, tal mudança não se tornaria possível devido ao pequeno volume das mini câmaras. Assim, a provável inserção de uma fonte externa diminuiria o volume da mini câmara ainda mais, provocando a alteração dos resultados.

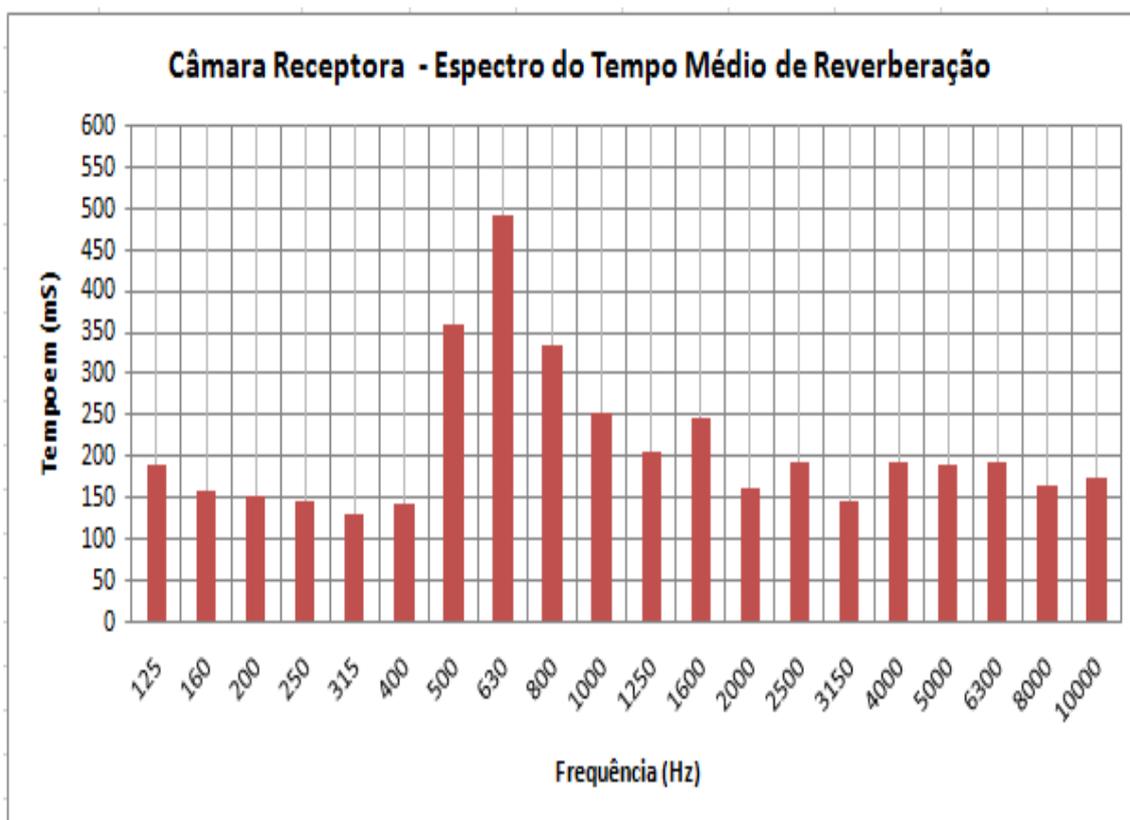
Dessa forma, os resultados das medições de tempo de reverberação estão apresentados na Tab. 5.8, e na Fig. 5.15, a seguir:

Tabela 5.8 – Medições de tempo de reverberação da câmara receptora

Freq (Hz)	Tempo em (mS)
125	191
160	159
200	153
250	147
315	131
400	143
500	358
630	492
800	334
1000	254
1250	204
1600	247
2000	161
2500	193
3150	147
4000	192
5000	190
6300	192
8000	166
10000	173

Fonte: Próprio autor

Figura 5.15 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.8



Fonte: Próprio autor

### 5.1.7 Cálculo da Perda de Transmissão

Diante dos resultados apresentados, com as diferenças de *NPS* das partições ensaiadas nas mini câmaras geminadas – emissora e receptora – além dos resultados do tempo médio de reverberação da câmara receptora, é possível calcular a Perda de Transmissão, *PT*, das partições de vidros duplos e triplos. Assim, para esse caso, pode-se calcular a *PT* através da seguinte expressão, dada por:

$$PT = (L_1 - L_2) + 10 \log S_2 - 10 \log 0,161 \frac{V_2}{T_2} \quad (5.1)$$

Onde:

$L_1 - L_2$  é a diferença de *NPS* entre as câmaras, emissora e receptora, respectivamente (dB);

$S_2$  é a área da partição ( $m^2$ ); e

$T_2$  é o tempo de reverberação da câmara receptora para cada banda de oitava (s).

Para o conjunto de mini câmaras de transmissão sonora utilizado têm-se os seguintes parâmetros:

- Volume da câmara receptora = 0, 21632  $m^3$ ;
- Área da superfície da partição = 0, 2704  $m^2$ .

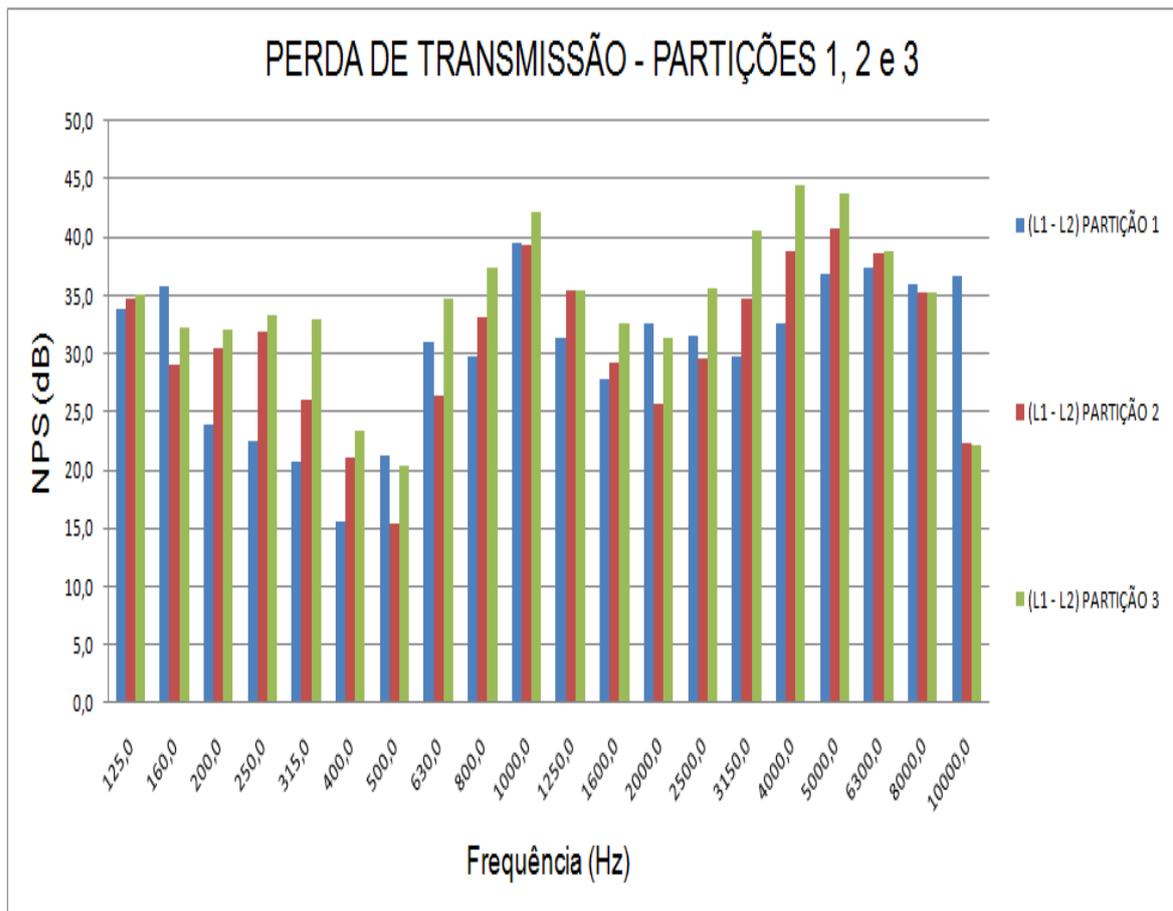
Os resultados dos cálculos da *PT* estão expressos na Tab. 5.9 e apresentados em forma gráfica, na Fig. 5.16.

Tabela 5.9 – Perda de Transmissão das Partições 1, 2 e 3

Freq (Hz)	PT PARTIÇÃO 1 (dB)	PT PARTIÇÃO 2 (dB)	PT PARTIÇÃO 3 (dB)
125	33,9	34,7	35,0
160	35,7	29,0	32,3
200	23,9	30,4	32,1
250	22,5	31,9	33,4
315	20,7	26,1	32,9
400	15,7	21,1	23,4
500	21,3	15,4	20,3
630	31,0	26,4	34,7
800	29,8	33,0	37,4
1000	39,4	39,3	42,1
1250	31,3	35,5	35,4
1600	27,8	29,2	32,5
2000	32,7	25,7	31,4
2500	31,6	29,6	35,6
3150	29,7	34,8	40,6
4000	32,6	38,7	44,5
5000	36,8	40,7	43,8
6300	37,3	38,6	38,8
8000	36,0	35,3	35,3
10000	36,7	22,3	22,2

Fonte: Próprio autor

Figura 5.16 – Gráfico de *PT* das partições 1, 2 e 3



Fonte: Próprio autor

### 5.1.8 Interpretação dos Resultados

A seguir, são discutidos os resultados dos ensaios realizados nas mini câmaras geminadas e nas três partições de vidro:

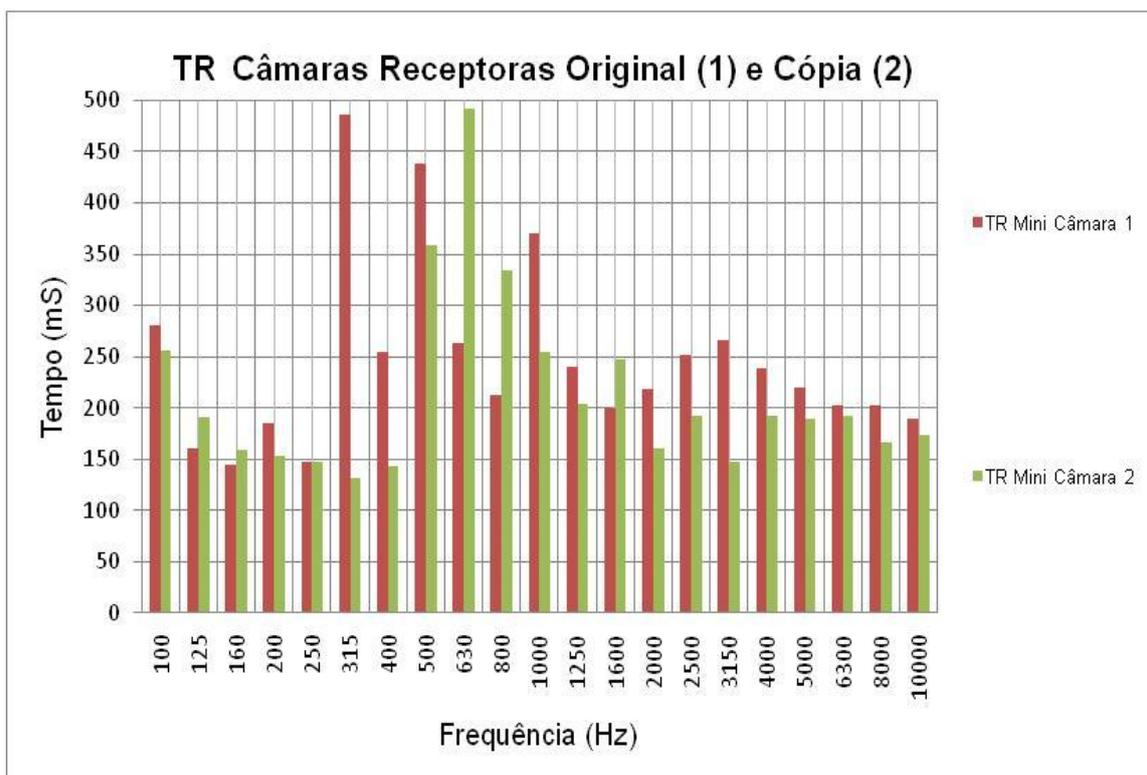
- Os resultados das medições de *TR* obtidos nas mini câmaras geminadas aperfeiçoadas apresentaram bastante coerência, quando comparados com os resultados de medições realizadas nas mini câmaras desenvolvidas no trabalho de Aviz (2006). A Tab. 5.10 e a Fig. 5.17 mostram as comparações dos resultados de medições de *TR* realizadas nos dois conjuntos de câmaras;

Tabela 5.10 – Diferença de TR nas mini câmaras receptoras

Freq (Hz)	TR Mini Câmara 1	TR Mini Câmara 2
100	281	256
125	161	191
160	144	159
200	185	153
250	147	147
315	486	131
400	254	143
500	438	358
630	263	492
800	212	334
1000	371	254
1250	240	204
1600	200	247
2000	219	161
2500	251	193
3150	266	147
4000	239	192
5000	220	190
6300	203	192
8000	202	166
10000	189	173

Fonte: Próprio autor

Figura 5.17 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.10



Fonte: Próprio autor

- As bandas de frequência de 31,5 a 80 Hz apresentaram resultados de diferença de NPS instáveis e pouco confiáveis para as três partições ensaiadas;
- As diferenças de NPS por banda de 1/3 de oitava apresentaram atenuações mínimas e máximas bem definidas na faixa de 100 Hz a 10 kHz, para as três partições ensaiadas, exceto na região compreendida entre as bandas de 400 a 800 Hz. Assim, optou-se por analisar as frequências naturais das mini câmaras.
- Para o cálculo das frequências naturais das mini câmaras utilizou-se a Eq. (2.18). Os valores encontrados para os primeiros modos coincidem com as bandas de instabilidade entre 400 e 630 Hz. A Tab. 5.11 apresenta os resultados calculados, com  $n_x$ ,  $n_y$  e  $n_z$  variando de 0 a 3, e  $L_x$ ,  $L_y$  e  $L_z$  com valores fixos de 0,8, 0,52 e 0,52 m, respectivamente;

Tabela 5.11 – Primeiras frequências naturais das mini câmaras geminadas

Freq	Nx	Ny	Nz
214,4	1	0	0
329,8	0	0	1
329,8	0	1	0
393,4	1	0	1
393,4	1	1	0
428,8	2	0	0
466,4	0	1	1
513,3	1	1	1
540,9	2	0	1
540,9	2	1	0
643,1	3	0	0
659,6	0	0	2
659,6	0	2	0
693,6	1	0	2
693,6	1	2	0
722,8	3	0	1
722,8	3	1	0
737,5	0	1	2
737,5	0	2	1
768,0	1	1	2
768,0	1	2	1
786,7	2	0	2
786,7	2	2	0
853,0	2	2	1
853,0	2	1	2

Fonte: Próprio autor

- Os resultados dos cálculos de *PT* das três partições ensaiadas tiveram seus valores acima das diferenças de níveis medidos. Tal fato deve ser creditado ao pequeno volume interno das mini câmaras, o que não possibilita resultados mais precisos de medições, como os resultados realizados em câmaras padrões, em que partições desse tipo são inseridas em nichos;
- As medições de *TR* na câmara receptora revelaram uma grande variação nos resultados obtidos das bandas de frequência de 400 a 630 Hz. Tal variação está associada à mesma instabilidade percebida nos resultados das medições de diferença de níveis realizadas nas mini câmaras e está diretamente associada a uma ressonância nessa região, conforme resultados apresentados anteriormente.
- Os resultados dos ensaios nas partições de vidro corroboram os resultados dos estudos de Quirt (1983) para perda de transmissão (*PT*) em partições de vidros duplos e triplos. A *PT* na partição de vidro duplo se mostrou bastante similar à *PT* na partição de vidro triplo. É válido observar que a construção de tais esquadrias necessita de grande rigor em suas vedações de flanco sob pena da diminuição de *PT* do conjunto esquadria-partição. A Fig. 5.18 mostra detalhes em corte de um conjunto esquadria-vidro duplo, com espaçamento entre vidros e o devido rigor nas vedações de flancos.

Figura 5.18 – Vedação do conjunto com borrachas laterais



Fonte: Próprio autor

## 5.2 ENSAIOS EM ELEMENTOS PARA ABSORÇÃO SONORA

Atualmente, a quase totalidade das construtoras está adicionando sacadas aos projetos de edifícios, devido à forte demanda do mercado por este elemento de edificação. No entanto, os elementos construtivos dessas sacadas, em geral, são constituídos de materiais rígidos, como por exemplo, pisos cerâmicos, paredes com pastilhas cerâmicas, forros de gesso, peitoris de vidro, peitoris de concreto, etc.

Entende-se que o uso de tais materiais tenha motivações estéticas, e que sua utilização seja mesmo motivada pela grande durabilidade conferida por aqueles elementos, ou até mesmo pela facilidade de instalação e manutenção encontrada.

Este tópico mostrará os resultados do desenvolvimento de elementos absorvedores, viáveis em todos os aspectos construtivos, e cuja finalidade é sua associação aos elementos comumente usados nas fachadas de edificações com sacadas frontais às ruas e avenidas de grande fluxo de veículos, sujeitas aos incômodos causados pelo ruído de tráfego.

### 5.2.1 A Mini Câmara Reverberante

Para os ensaios dos protótipos de absorvedores acústicos desenvolvidos neste trabalho, utilizou-se a câmara reverberante em escala reduzida de 1:6, desenvolvida por Guedes (2007). As dimensões dessa câmara são: 1,20 m de comprimento, 1,00 m de largura e 0,80 m de altura, com área interna de 5,92 m<sup>2</sup> e volume interno de 0,96 m<sup>3</sup>.

A construção da mini câmara foi realizada de acordo com as recomendações da norma ISO 354 (*Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms*, 1999) e a norma ISO 3741 (*Acoustics – Determination of Sound Power Levels of Noise Sources Using Sound Pressure Levels – Precision Method for Reverberation Rooms*, 1999). A Fig. 5.19 mostra a mini câmara reverberante com um dos protótipos desenvolvidos para promover absorção sonora.

Figura 5.19 – Mini câmara reverberante com protótipo



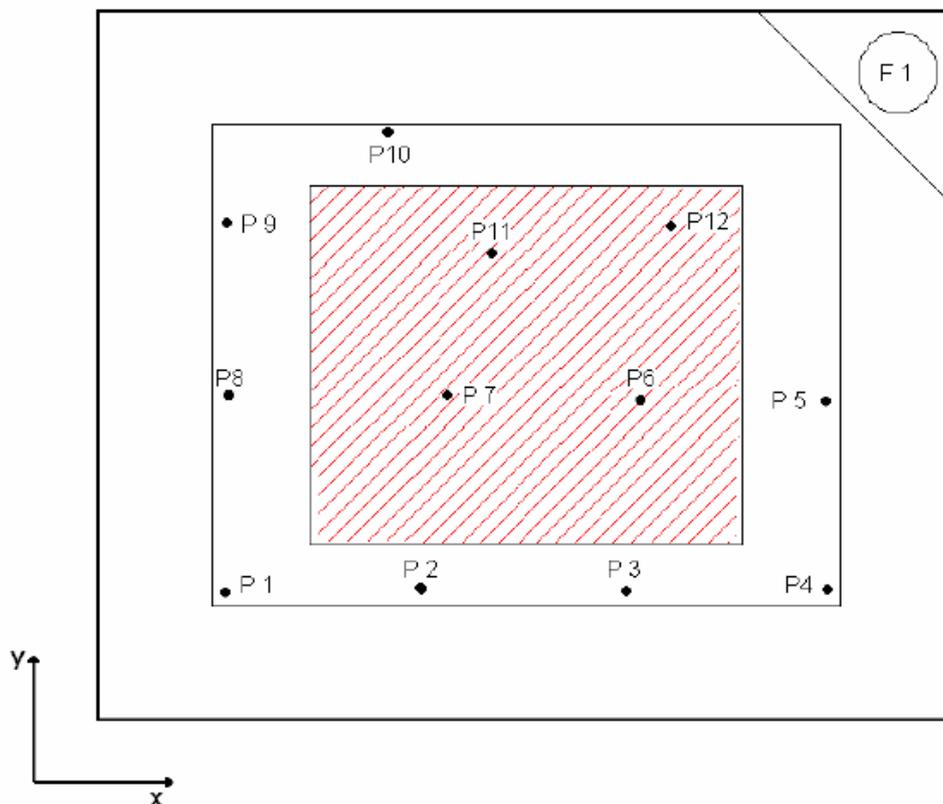
Fonte: Próprio autor

A norma ISO 354 especifica um método para medição de coeficiente de absorção sonora de materiais usados para tratamento de paredes e forros, ou da área de absorção sonora equivalente de objetos, tais como, móveis, pessoas, ou absorvedores suspensos em uma câmara reverberante. Esta norma se baseia na equação de Sabine para o cálculo do  $TR$  em câmaras reverberantes, a qual foi a equação usada para os cálculos de  $TR$  neste trabalho. Esta norma encontra-se em fase de revisão e é o principal documento utilizado pela comissão técnica da ABNT na elaboração de uma norma brasileira (GUEDES, 2007).

A norma ISO 354 estabelece as posições de microfones, para ensaios em câmaras reverberantes. No caso da mini câmara usada neste trabalho, as posições seguiram uma proporção estabelecida no trabalho de Guedes (2007). Assim, o microfone deve estar separado em pelo menos 0,25 m do próximo ponto de medição, distantes 0,33 m da fonte e 0,17 m de qualquer superfície interna da mini câmara. A fonte sonora utilizada nas medições foi uma fonte dodecaédrica construída de acordo com as normas Internacionais ISO 140, ISO 3382 e DIN 52210, emitindo ruído rosa com resposta plana em frequência de 100 Hz a 10 kHz.

A Fig. 5.20 mostra um desenho esquemático com as localizações da fonte e pontos de medição dentro da mini câmara reverberante e a Tab. 5.12 apresenta as coordenadas dos pontos de medição.

Figura 5.20 – Pontos de medição no interior da mini câmara



Fonte: Guedes 2007

Tabela 5.12 – Coordenadas dos pontos de medição

Ponto	Dimensão x (m)	Dimensão y (m)	Dimensão z (m)
1	0,17	0,17	0,30
2	0,46	0,17	0,45
3	0,74	0,17	0,30
4	1,02	0,17	0,45
5	1,02	0,42	0,35
6	0,74	0,42	0,40
7	0,46	0,42	0,30
8	0,17	0,42	0,45
9	0,17	0,66	0,35
10	0,39	0,83	0,40
11	0,60	0,66	0,45
12	0,81	0,66	0,30

Fonte: Guedes 2007

As bandas de frequência de interesse do estudo em questão estão compreendidas entre 125 Hz e 8 kHz, a qual é a faixa comumente trabalhada na Acústica Arquitetônica.

### **5.2.2 Absorção Sonora de Elementos Desenvolvidos para Composição de Fachadas de Edificações**

Os protótipos de absorvedores acústicos com dupla face e formato retangular possuem área útil de 0,3 m<sup>2</sup>, o equivalente a 5% da área interna da mini câmara reverberante e foram especialmente desenvolvidos para promover absorção sonora em paredes e tetos de sacadas.

A construção desses protótipos é considerada bastante simples, já que os mesmos utilizam as paredes de alvenaria das sacadas ou as lajes do teto, como elementos de suporte.

O protótipo absorvedor desenvolvido para os ensaios de absorção sonora consiste de uma placa de lã mineral envolta nas laterais por uma moldura em madeira do tipo MDF e coberta nas duas faces absorvedoras, com tela metálica micro perfurada de um lado e com tecido ortofônico (tecido com 100% de transparência acústica para a banda de frequências do estudo) de outro.

Dessa forma, o protótipo não precisa de um fundo rígido próprio e, assim, pode funcionar em duas configurações, expondo-se o revestimento metálico, ou o tecido ortofônico.

A partir dessas informações, são apresentadas as etapas do desenvolvimento desses elementos.

### **5.2.3 Materiais Utilizados na Confecção do Protótipo**

- Caixa envoltória com tiras de MDF 15 mm de espessura com largura de 100 mm e comprimento de 50 mm e 60 mm;
- Cola Branca e pregos de uma polegada;
- Tela metálica micro perfurada;

- Tela ortofônica de tecido impermeabilizado;
- Lã de rocha mineral com 100 mm de espessura e 32 kg/m<sup>3</sup> de densidade volumétrica;
- Parafusos com fenda Philips e cabeça cônica.

As Fig. 5.21 a 5.25 mostram as etapas de montagem do protótipo.

Figura 5.21 – Tela metálica micro perfurada de acabamento do protótipo



Fonte: Próprio autor

Figura 5.22 – Tecido ortofônico, aplicado em uma das faces do protótipo



Fonte: Próprio autor

Figura 5.23 – Lã de rocha com 32 kg/m<sup>3</sup> e 100 mm de espessura



Fonte: Próprio autor

Figura 5.24 – Suporte lateral em MDF 15 mm



Fonte: Próprio autor

Figura 5.25 – Modelo de absorvedor acústico finalizado



Fonte: Próprio autor

#### 5.2.4 Ensaio do Tempo de Reverberação da Mini Câmara Reverberante

Com o modelo desenvolvido, foi possível comparar o  $TR$  da câmara com e sem a presença do protótipo desenvolvido em seu interior. A seguir, são apresentados os resultados das medições do tempo de reverberação da mini câmara vazia e, posteriormente, com a inserção do protótipo com a face de tela micro perfurada voltada para cima.

As medições estão de acordo com os procedimentos indicados na norma ISO 354-6.

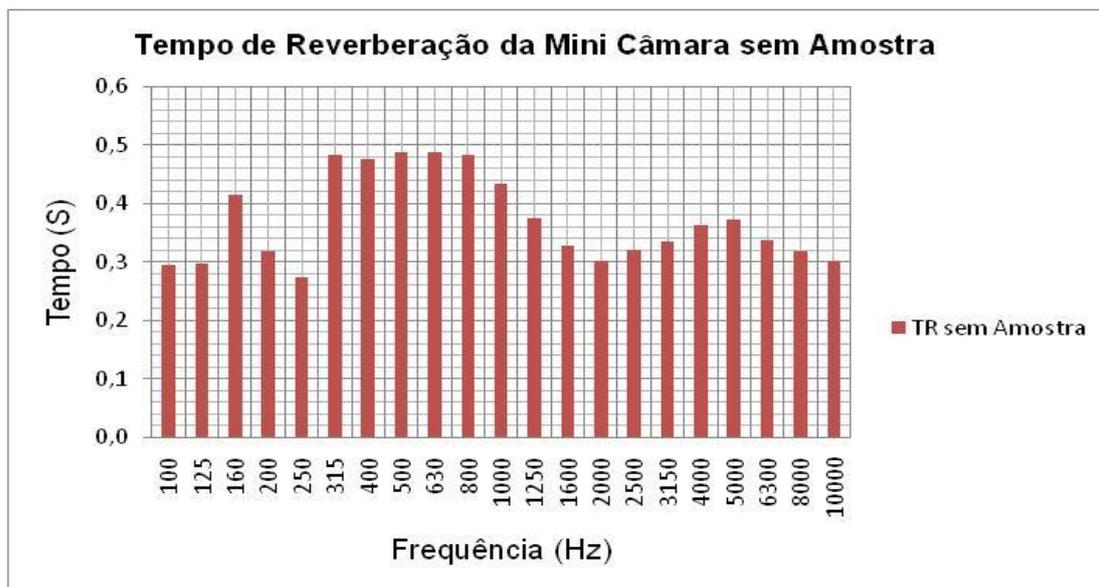
A Tab. 5.13 apresenta os resultados dos tempos de reverberação da mini câmara reverberante sem a introdução do protótipo e a Fig. 5.26 mostra esses resultados na forma gráfica.

Tabela 5.13 –  $TR$  da mini câmara reverberante sem amostra

<b>Freq (Hz)</b>	<b>TR sem Amostra</b>
<b>100</b>	0,295
<b>125</b>	0,297
<b>160</b>	0,414
<b>200</b>	0,318
<b>250</b>	0,274
<b>315</b>	0,484
<b>400</b>	0,476
<b>500</b>	0,487
<b>630</b>	0,488
<b>800</b>	0,483
<b>1000</b>	0,433
<b>1250</b>	0,376
<b>1600</b>	0,327
<b>2000</b>	0,301
<b>2500</b>	0,320
<b>3150</b>	0,334
<b>4000</b>	0,363
<b>5000</b>	0,373
<b>6300</b>	0,338
<b>8000</b>	0,318
<b>10000</b>	0,303

Fonte: Próprio autor

Figura 5.26 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.13



Fonte: Próprio autor

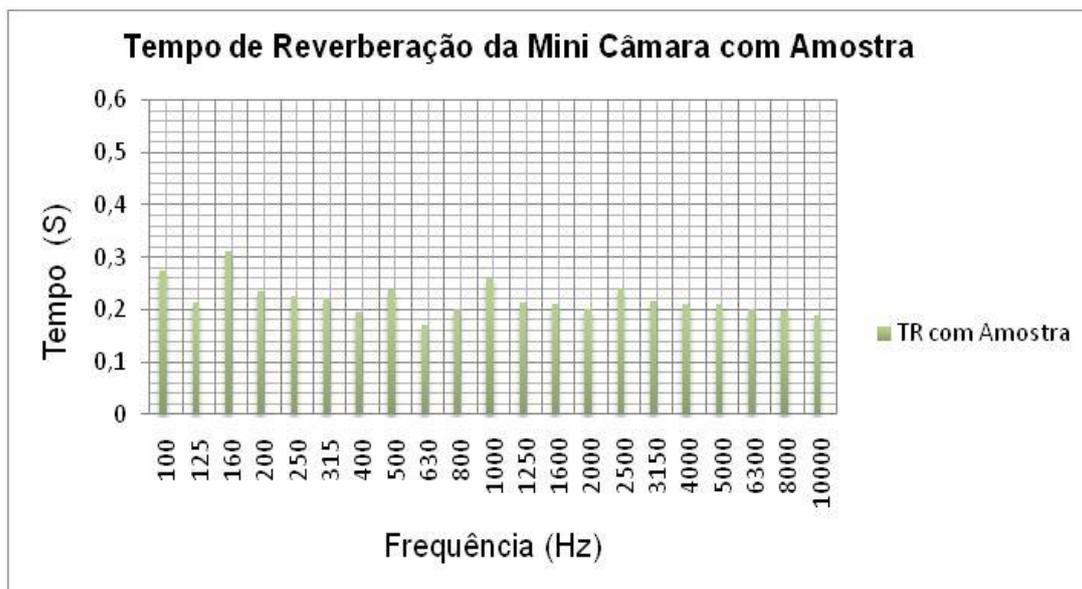
A Tab. 5.14 apresenta os resultados dos tempos de reverberação da mini câmara reverberante com a introdução do protótipo e a Fig. 5.27 mostra esses resultados na forma gráfica.

Tabela 5.14 – TR da mini câmara reverberante com amostra

Freq (Hz)	TR com Amostra
100	0,275
125	0,215
160	0,312
200	0,235
250	0,225
315	0,224
400	0,194
500	0,238
630	0,172
800	0,201
1000	0,258
1250	0,213
1600	0,211
2000	0,200
2500	0,242
3150	0,218
4000	0,209
5000	0,211
6300	0,201
8000	0,197
10000	0,188

Fonte: Próprio autor

Figura 5.27 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.14



Fonte: Próprio autor

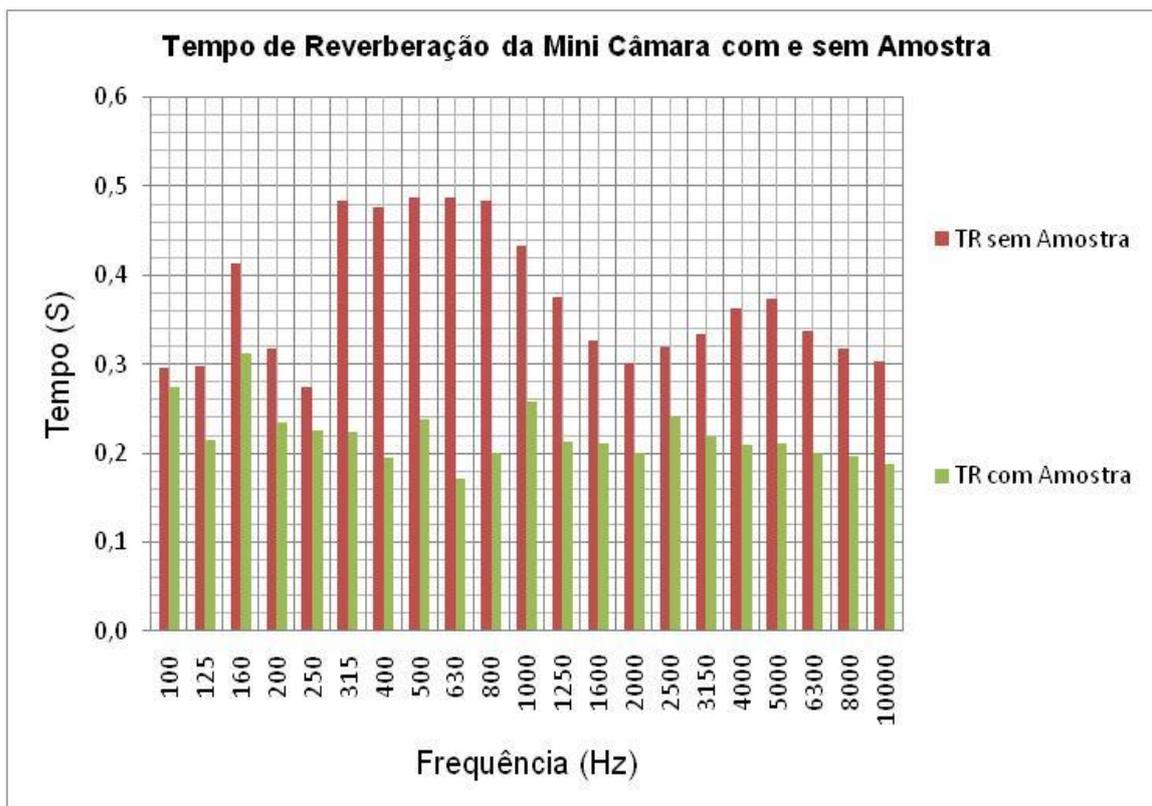
A Tab. 5.15 apresenta os comparativos dos tempos de reverberação da mini câmara reverberante com e sem a introdução do protótipo e a Fig. 5.28 mostra esses resultados na forma gráfica.

Tabela 5.15 – Comparativo de TR com e sem amostra

Freq (Hz)	TR sem Amostra	TR com Amostra
100	0,295	0,275
125	0,297	0,215
160	0,414	0,312
200	0,318	0,235
250	0,274	0,225
315	0,484	0,224
400	0,476	0,194
500	0,487	0,238
630	0,488	0,172
800	0,483	0,201
1000	0,433	0,258
1250	0,376	0,213
1600	0,327	0,211
2000	0,301	0,200
2500	0,320	0,242
3150	0,334	0,218
4000	0,363	0,209
5000	0,373	0,211
6300	0,338	0,201
8000	0,318	0,197
10000	0,303	0,188

Fonte: Próprio autor

Figura 5.28 – Gráfico dos resultados da Tab. 5.15



Fonte: Próprio autor

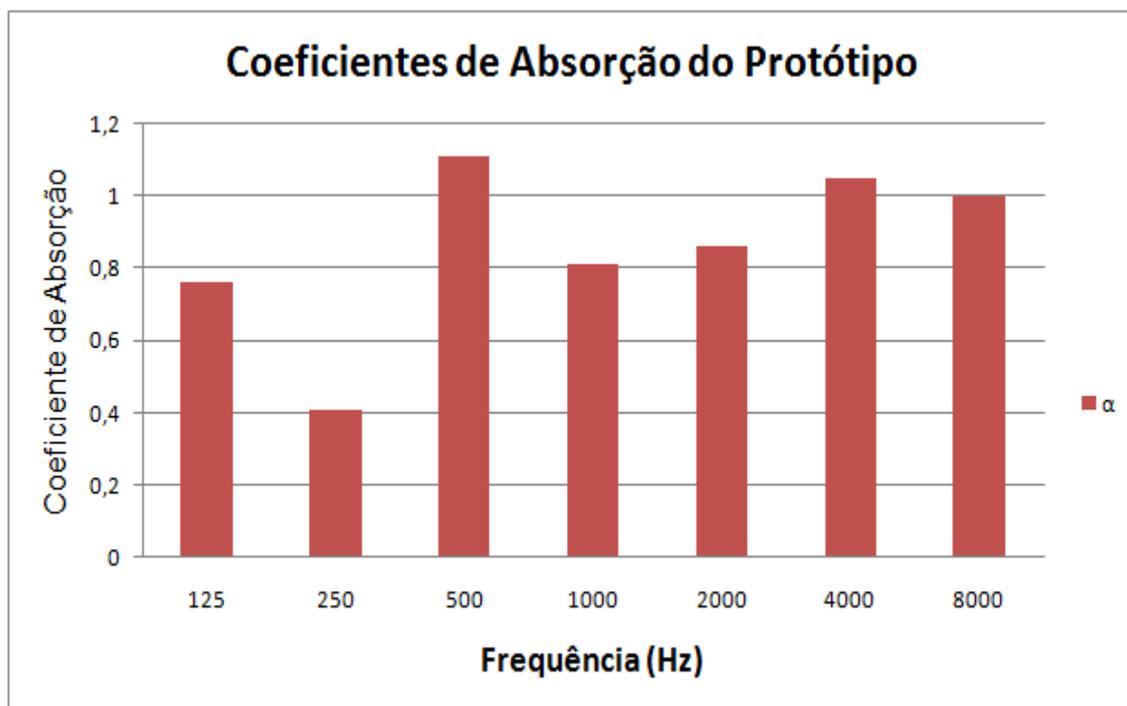
A Tab. 5.16 apresenta os coeficientes de absorção do protótipo calculados através da Eq. (3.9), com  $V = 0,96 \text{ m}^3$  e  $S = 0,3 \text{ m}^2$ . A Fig. 5.29 mostra esses resultados na forma gráfica.

Tabela 5.16 - Coeficientes de absorção acústica do protótipo

<b>Freq (Hz)</b>	<b><math>\alpha</math></b>
<b>125</b>	<b>0,76</b>
<b>250</b>	<b>0,41</b>
<b>500</b>	<b>1,11</b>
<b>1000</b>	<b>0,81</b>
<b>2000</b>	<b>0,86</b>
<b>4000</b>	<b>1,05</b>
<b>8000</b>	<b>1,00</b>

Fonte: Próprio autor

Figura 5.29 – Gráfico com os resultados da Tab. 5.16



Fonte: Próprio autor

### 5.2.5 Interpretação dos Resultados

Os resultados dos ensaios do *TR*, com a utilização do protótipo absorvedor, apresentaram valores de atenuação expressivos, em relação a sua pequena área útil, ou seja, a área de 5% de absorção do protótipo foi responsável pela diminuição do *TR* da mini câmara em todas as bandas de frequência de interesse desse estudo.

Os coeficientes de absorção sonora do protótipo apresentaram valores satisfatórios em todas as bandas de frequência, com exceção da banda de 250 Hz, onde a atenuação foi baixa em comparação às outras bandas de frequência.

## CAPÍTULO 6

### 6.1 RESULTADOS NUMÉRICOS

Este capítulo trata dos resultados das simulações numéricas realizadas com a utilização de um *software* para modelagem acústica. Neste caso, o EP25 foi desenhado em um programa *CAD* em três dimensões e posteriormente importado e modelado pelo *software ODEON 10.0 Combined*, o qual utiliza a metodologia híbrida de raios acústicos e fontes virtuais.

No método híbrido de raios acústicos, alguns *softwares* combinam os métodos das Fontes Virtuais e do Traçado dos Raios buscando obter bons resultados e processamento mais rápido. A chave na combinação destes dois métodos é o modelo escolhido para realizar o teste de visibilidade, sendo que, se um raio passa pelo receptor, a fonte virtual correspondente do mesmo deve ser audível (VORLÄNDER, 2008).

O objetivo principal da modelagem foi, a partir da comparação com os resultados experimentais apresentados no capítulo 4, simular a utilização das partições e protótipos, apresentados no capítulo 5, visando à redução do ruído nos ambientes investigados. Portanto, este capítulo apresenta a validação do modelo desenvolvido e a sua utilização para os testes de soluções virtuais de redução de ruído nas sacadas do EP25.

O Apêndice 1 deste trabalho mostra, com detalhes, todos os passos para uso do *ODEON*, além de relatórios gerados pelo *software*, aplicados a este tipo de espaço, como forma de colaboração para trabalhos futuros.

#### 6.1.1 Desenho do EP25 em *CAD*

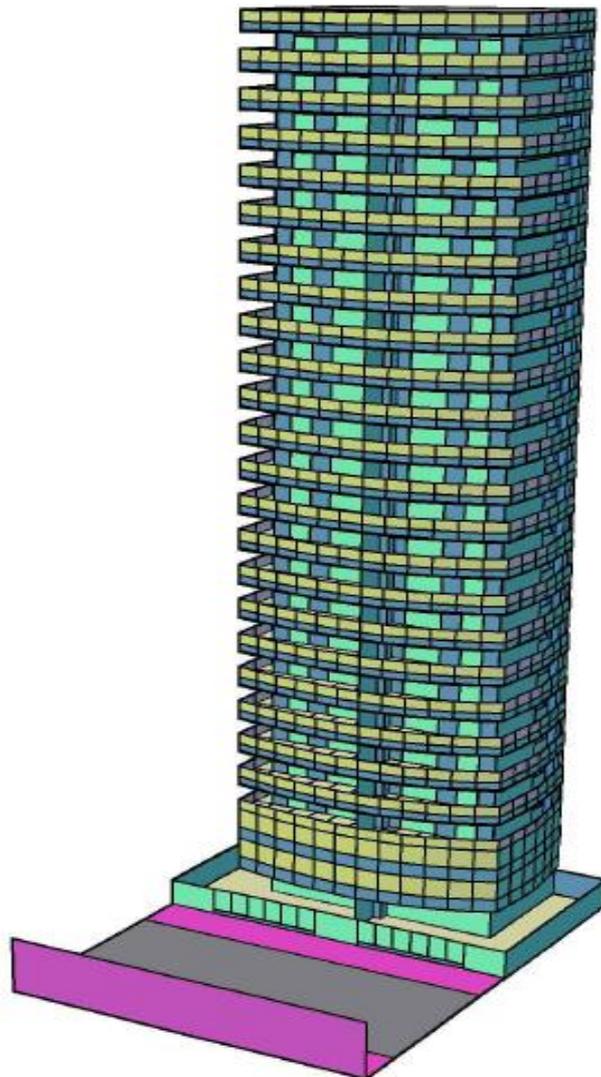
Inicialmente, houve a necessidade de medir com detalhes os espaços externos e internos do EP25, para confecção de uma planta em três dimensões (3D), já que as plantas arquitetônicas da edificação não foram disponibilizadas.

A planta 3D do EP25 foi dividida em várias camadas (*Layers*). Camadas são comumente usadas em programas de modelagem *CAD*, a fim de se obterem geometrias complexas gerenciáveis. As camadas do EP25 estão descritas, a seguir:

- Camada 01 – Paredes com pastilhas cerâmicas;
- Camada 02 – Paredes em concreto;
- Camada 03 – Pisos de cerâmica;
- Camada 04 – Piso de asfalto;
- Camada 05 – Tetos das sacadas;
- Camada 06 – Peitoris de vidro comum;
- Camada 07 – Portas e janelas de vidro comum;
- Camada 08 – Volume de controle.

Dessa forma, obteve-se um desenho externo do EP25, com dimensões bastante aproximadas das reais, conforme ilustra a Fig. 6.1.

Figura 6.1 – Desenho em 3D do EP25



Fonte: Próprio autor

De posse do desenho do EP25 em 3D, foi possível importá-lo com êxito para o *ODEON*, com cuidados posteriores em observar todas as suas superfícies, de modo a evitar possíveis desaparecimentos ou mesmo deformidades dessas superfícies, o que implicaria em vazamentos de raios acústicos.

### **6.1.2 Volume de Controle envolvendo o Modelo do EP25**

O *software ODEON* necessita de um volume fechado para simular as condições acústicas de um ambiente qualquer. Dessa forma, houve a necessidade de se adaptar um volume virtual ao modelo, considerando que o estudo da modelagem acústica do EP25 é exclusivo para as suas fachadas externas.

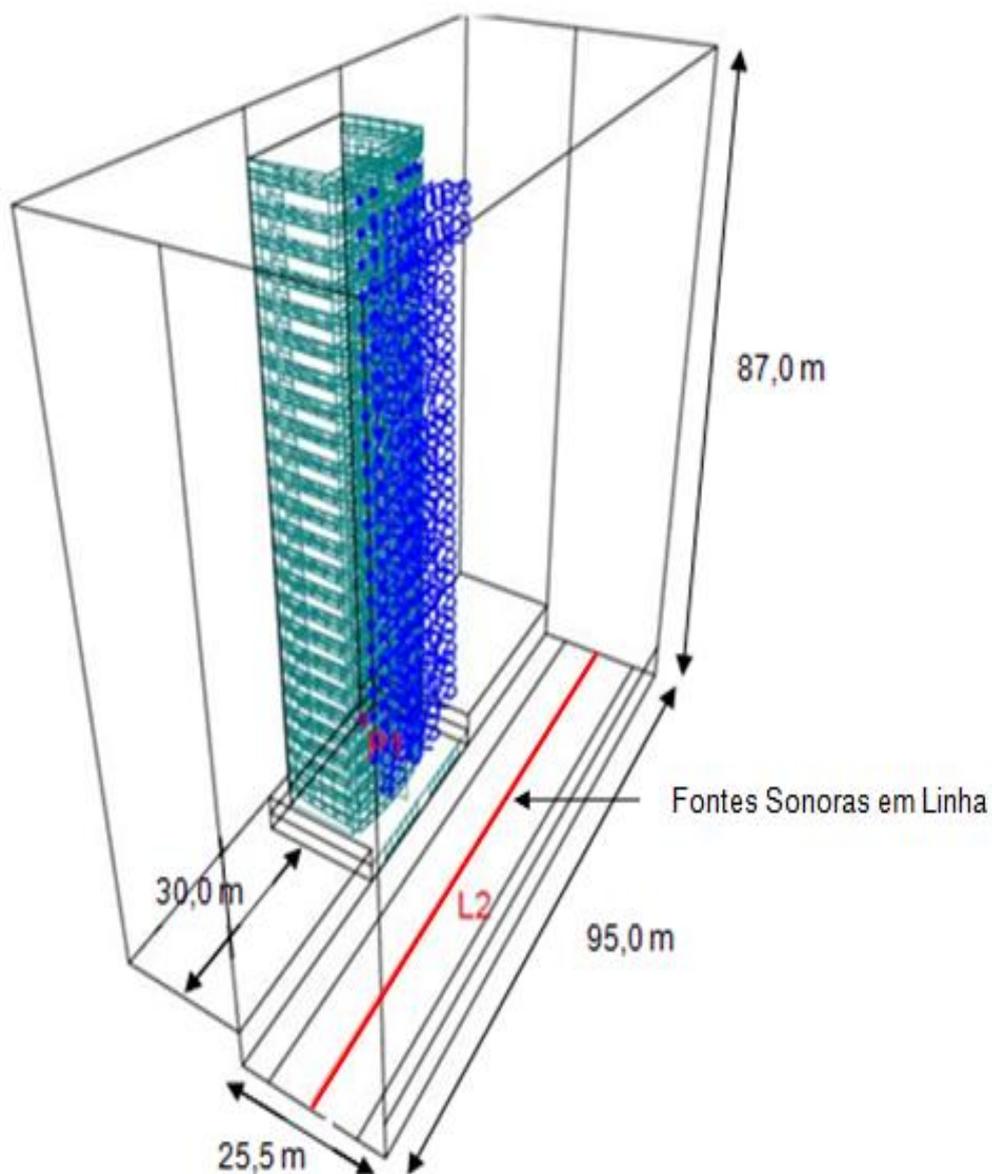
Assim, criou-se um volume virtual externo envolvendo o modelo, com 100% de absorção sonora associada às fronteiras representando o espaço aberto, simulando as condições de campo livre.

Depois da importação do desenho em 3D, utilizou-se o volume de controle envolvendo quatro partes principais do modelo, a saber:

- Região frontal do modelo, com distância perpendicular útil de 25,5 m até a parede virtual do outro lado da rua, incluindo as paredes das casas opostas;
- Região lateral direita, com distância perpendicular útil de 30,0 m até a parede virtual de início das fontes sonoras;
- Região lateral esquerda, com distância perpendicular útil de 30,0 m até a parede virtual do final das fontes sonoras;
- Região de altura do volume envolvendo as três regiões anteriormente citadas, com altura de 87,0 m.

A Fig. 6.2, mostra o EP25 modelado no *ODEON* e envolvido pelo volume de controle, construído com paredes virtuais e simulando uma absorção sonora de 100%.

Figura 6.2 – EP25 modelado no ODEON, onde a linha vermelha representa a fonte sonora e os pontos azuis os receptores virtuais

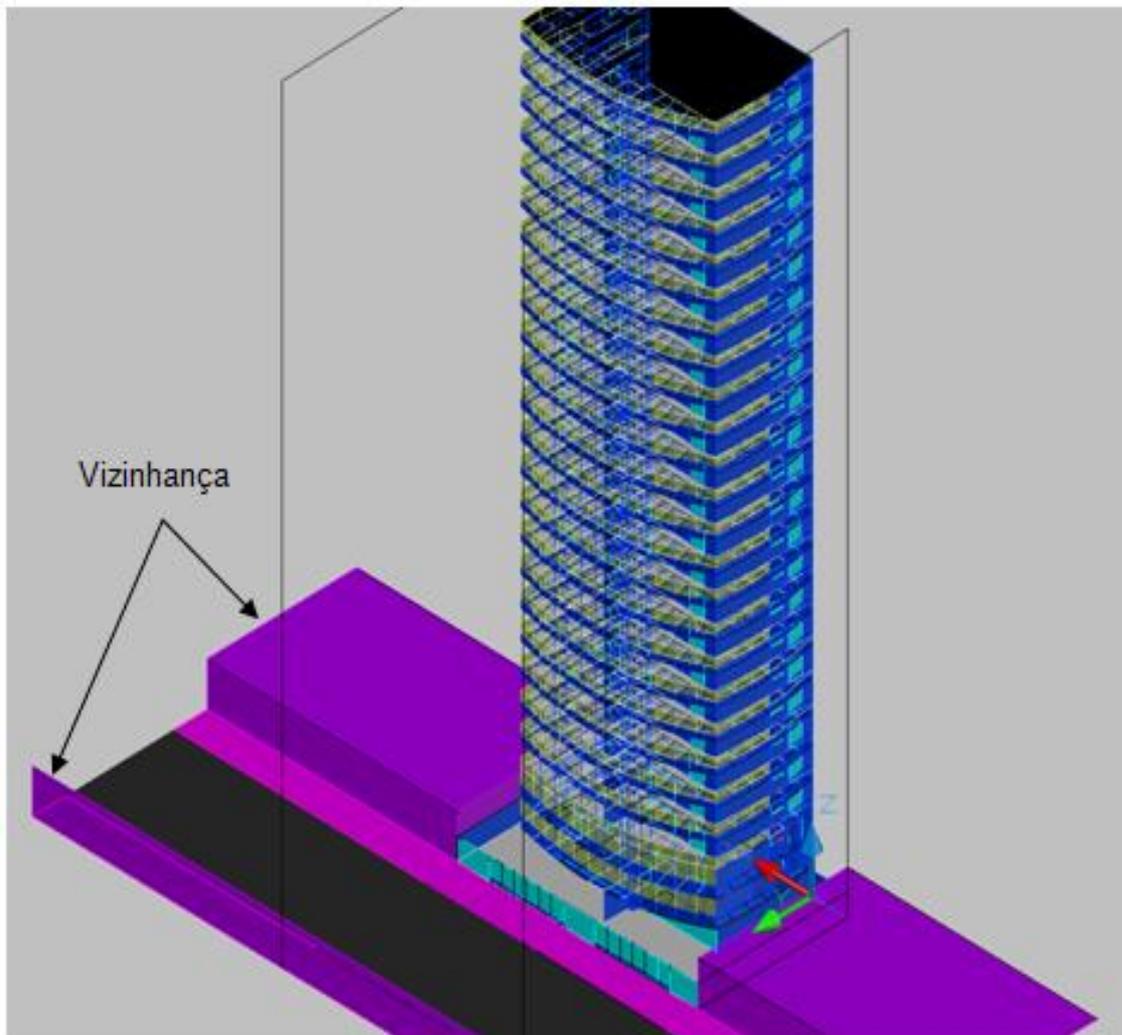


Fonte: Próprio autor

Dentro desse volume de controle foi possível simular o posicionamento das edificações vizinhas, tanto nas regiões laterais, quanto na frontal ao EP25. Tais edificações tiveram suas dimensões limitadas ao volume de controle, com altura média de 5,0 m.

A Fig. 6.3, obtida do modelo, mostra parcialmente o posicionamento dessas edificações.

Figura 6.3 – EP25 e vizinhança, modelados no ODEON



Fonte: Próprio autor

### 6.1.3 Primeira Simulação

Antes da primeira simulação do modelo, foi necessário um ajuste nos parâmetros de cálculos do *software*, a saber:

- a) Foram atribuídas propriedades para os materiais, utilizando a função *Assign Material Properties*, através do uso de uma lista de materiais disponibilizada na biblioteca do *software*. Os materiais definidos como comuns foram associados às camadas importadas, cada um, com seus respectivos coeficientes de absorção sonora. A Fig. 6.4, mostra alguns materiais selecionados na biblioteca do *software*, para compor as superfícies do modelo.

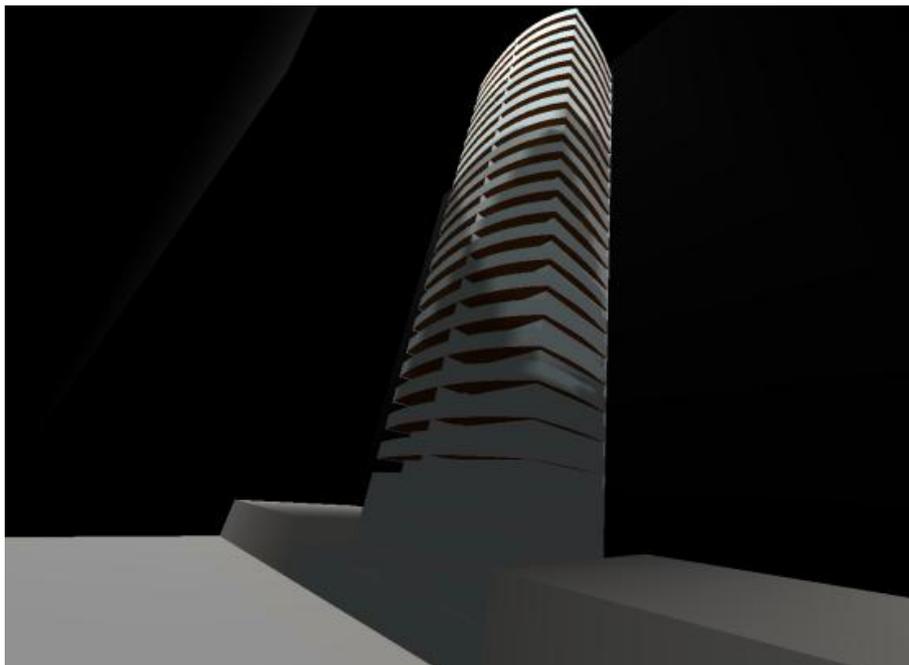
Figura 6.4 – Biblioteca de materiais do ODEON

Surface	Material	Scatter	Transp.	Type	Surface Name	Area
3192	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.892
3193	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.892
3194	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.838
3195	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.838
3196	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.838
3197	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.838
3198	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.838
3199	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.838
3200	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	2.008
3201	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	2.010
3202	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	2.306
3203	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	2.306
3204	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.888
3205	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.024
3206	10005	0.050	0.000	Normal	FEITORIL	1.200
3207	100	0.050	0.000	Normal	CALÇADA	355.900
3208	100	0.050	0.000	Normal	CALÇADA	355.900
3209	14216	0.050	0.000	Normal	PISTA	1156.674
3210	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	444.875
3211	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	539.934
3212	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	44.995
3213	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	150.001
3214	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	539.934
3215	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	150.001
3216	100	0.050	0.000	Normal	CASAS	44.995
3217	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	1839.600
3218	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	7349.332
3219	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	3469.821
3220	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	11.313
3221	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	2838.730
3222	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	11.313
3223	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	1486.615
3224	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	1839.600
3225	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	1486.616
3226	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	12.625
3227	1	0.050	0.000	Normal	VOLUME	2882.086

Fonte: Próprio autor

b) Através da função 3D View, foi possível a visualização em 3D do modelo, permitindo investigar sua geometria para detecção de alguns erros de superfícies, que posteriormente foram corrigidos. A Fig. 6.5, mostra uma imagem modelada em 3D.

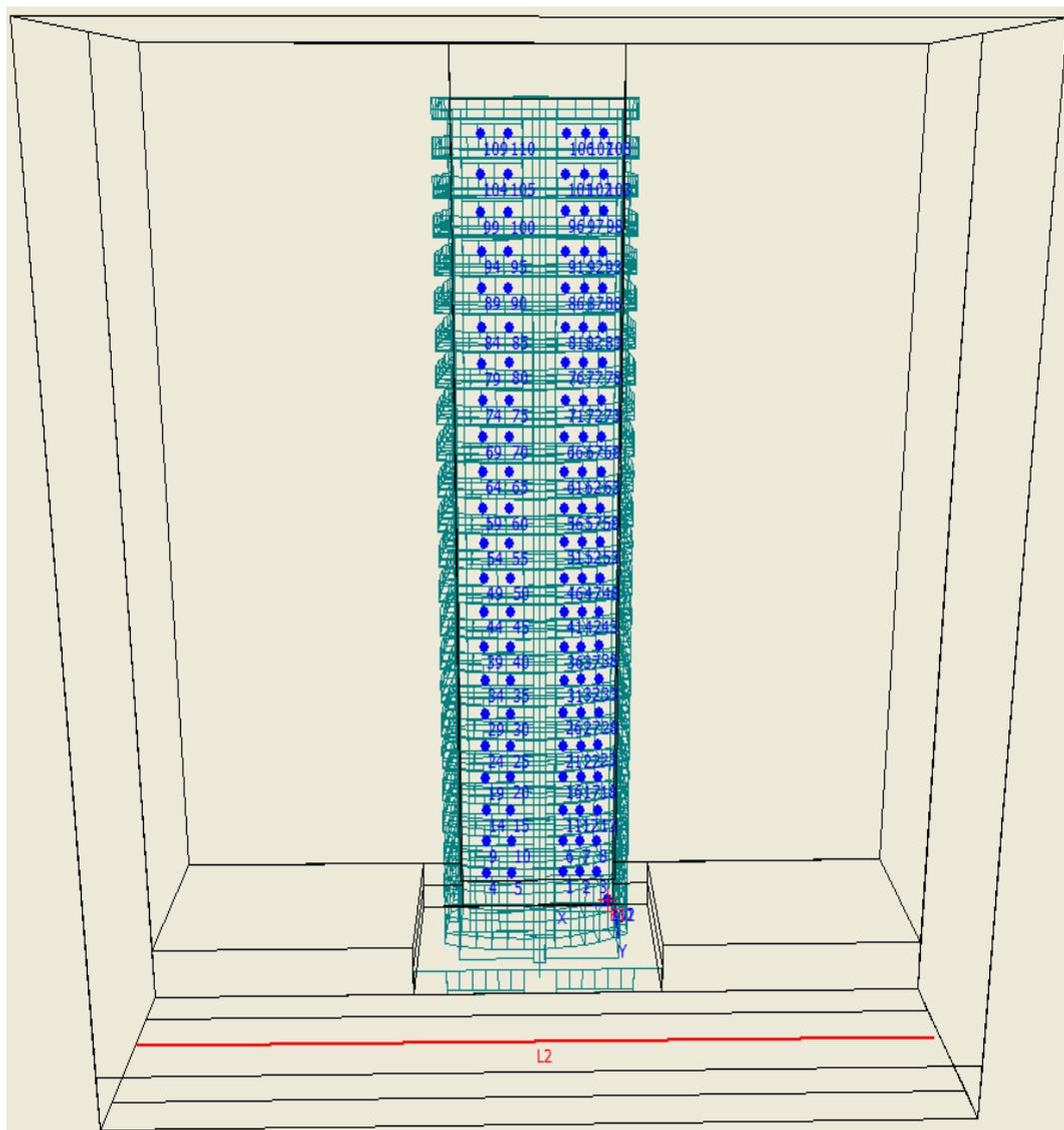
Figura 6.5 – Imagem do EP25 em 3D



Fonte: Próprio autor

- c) Através da função ‘*Define Sources and Receivers*’ foi possível configurar uma fonte sonora linear virtual, determinada para simular as fontes reais (veículos), bem como, dispor os microfones receptores em suas posições, tal qual realizado nas medições experimentais. A Fig. 6.6, extraída do *software*, ilustra o enunciado.

Figura 6.6 – EP25 com microfones virtuais



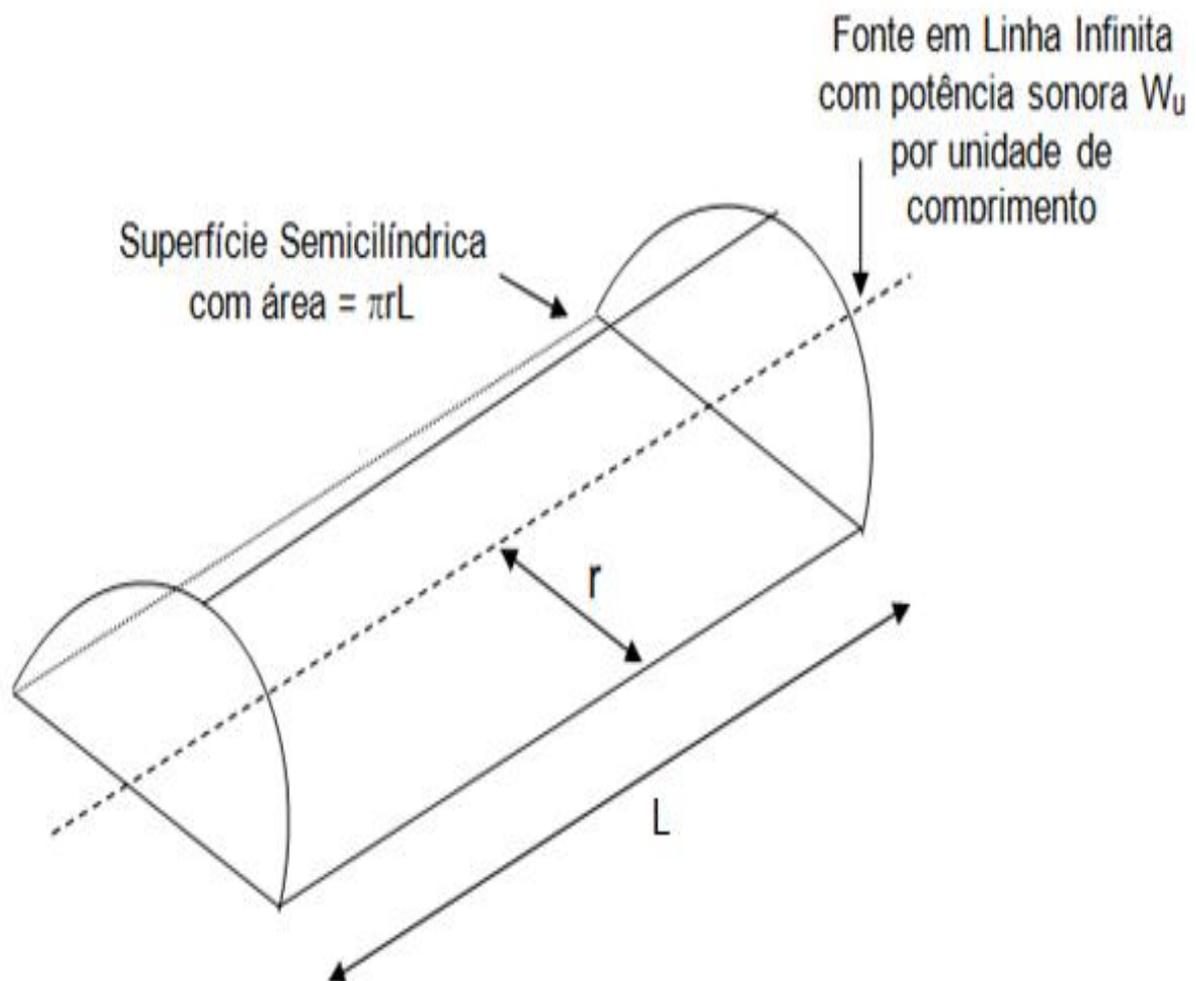
Fonte: Próprio autor

- d) A modelagem do EP25 considera as condições acústicas de campo livre. Mesmo assim, utilizou-se a função ‘*Global Estimate*’ para uma estimativa do *TR* do ambiente. Essa função estabiliza a curva de decaimento do *TR*, tornando bastante confiável o resultado das simulações.

e) Um parâmetro de grande importância para a caracterização do ruído de tráfego no modelo é o nível de potência sonora  $NWS$  emitido pelas fontes veiculares. Assim, foi realizado o cálculo do  $NWS$  dessas fontes utilizando o valor de  $L_{A10}$  como parâmetro que caracteriza o ruído de tráfego, com a utilização de uma expressão analítica adaptada para fontes cilíndricas. O nível de ruído para uma fonte em linha de comprimento infinito foi formulada segundo a teoria que se segue:

Uma avenida em linha reta com uma densidade uniforme de veículos ao longo do seu comprimento é um exemplo de “fonte em linha”. Neste caso, as ondas sonoras se propagam na forma de superfícies cilíndricas concêntricas, como na Fig. 6.7.

Figura 6.7 – Desenho esquemático da fonte em linha



Fonte: Próprio autor

Dessa forma, a intensidade sonora da fonte em linha é:

$$I = \frac{(W_u L)}{\pi r L} = \frac{W_u}{\pi r} \therefore \frac{I}{I_0} = \frac{W_u}{I_0 \pi r} \therefore \frac{I}{I_0} = \frac{W_u}{W_0} \cdot \frac{1m^2}{\pi r} = \left( \frac{W_u}{W_0} \right) \cdot \left( \frac{1m}{\pi r} \right)$$

$$\therefore 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{W_u}{W_0 \pi r} \therefore NI = NWS_u - 10 \log (\pi r)$$

mas, em campo livre:  $NI = NPS$ , portanto:

$$NPS = NWS_u - 10 \log r - 5, \text{ ou seja:}$$

$$NWS_u = NPS + 10 \log r + 5, \text{ trocando NPS por } L_{A10}, \text{ tem-se:}$$

$$NWS_u = L_{A10} + 10 \log r + 5 \tag{6.1}$$

Onde:

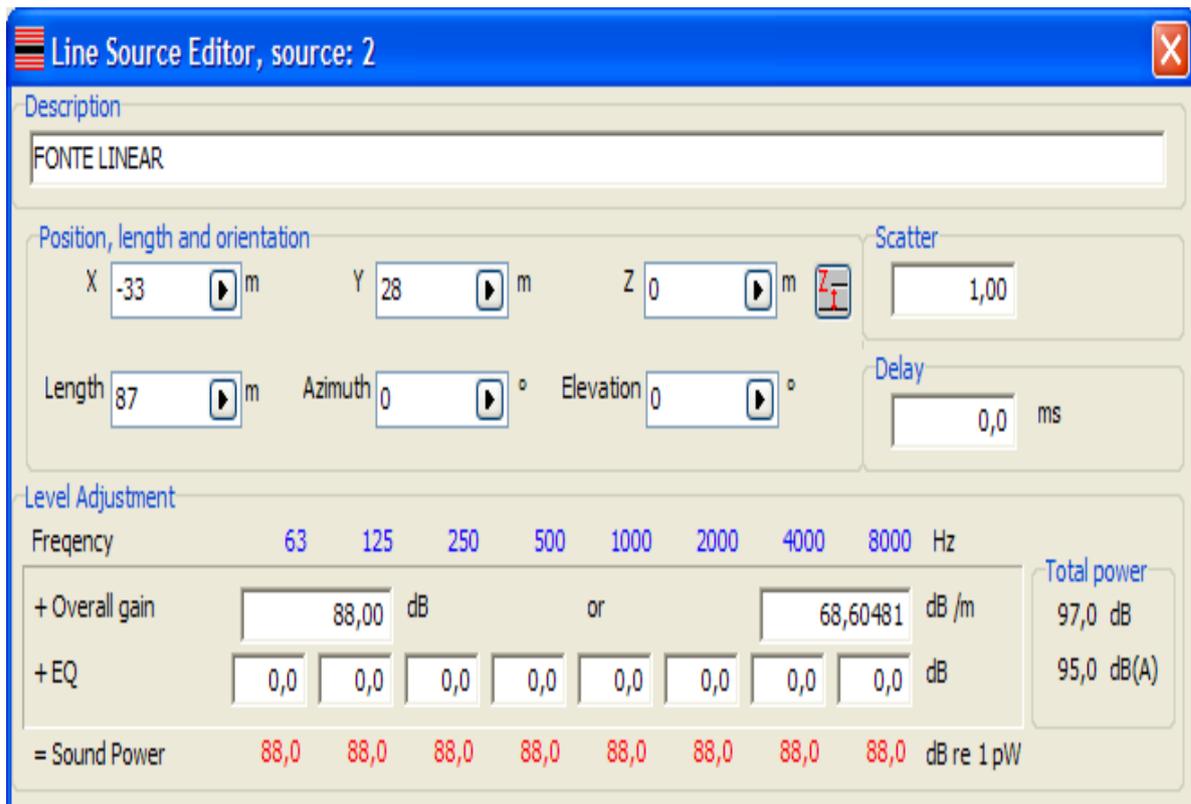
$NWS_u$  é o nível de potência sonora por unidade de comprimento (dB/m);

$r$  é a distância da fonte até o ponto de medição.

Então, para  $r = 6,5$  m, e  $L_{A10} = 75,0$  dB(A) tem-se  $NWS = 88,1$  dB(A)/m.

- f) Através da função '*Define a line source*' (definir uma fonte em linha), o valor de 88,1 dB(A)/m, do parâmetro  $NWS$ , foi usado como o nível de potência sonora emitido pela fonte linear (*source: 2*), com 1,0 m de comprimento e disposta na pista em frente e ao centro do EP25.
- g) Utilizando esta mesma função foi possível definir as coordenadas X, Y e Z da fonte em questão, conforme mostra a Fig. 6.8.

Figura 6.8 – ODEON com valor de *NWS*, espalhamento e coordenadas da fonte



Fonte: Próprio autor

Uma fonte pontual (*source: 1*), com valor nulo, precisou ser configurada para que o programa fizesse a compilação dos dados.

Observa-se, na Fig. 6.8, que as bandas de nível de ajuste de frequências (+EQ) não foram preenchidas, conservando assim seus valores nulos. Observa-se também, que a potência sonora, por banda de frequência manteve todos os valores em 88,0 dB. Finalmente observa-se que o valor de *NWS* = 88,1 dB/m, não foi preenchido na janela que indica dB/m, mas sim na janela *overall gain*.

- h) Depois da definição do número de raios acústicos emitidos pela fonte, através do uso da função '*Room Setup*' em 43.542 raios e ativação das fontes linear e pontual, foi possível realizar a primeira simulação das condições acústicas das áreas em estudo, no EP25.

O *ODEON* compilou os dados, em aproximadamente 5 minutos, com os resultados apresentados na Tab. 6.1.

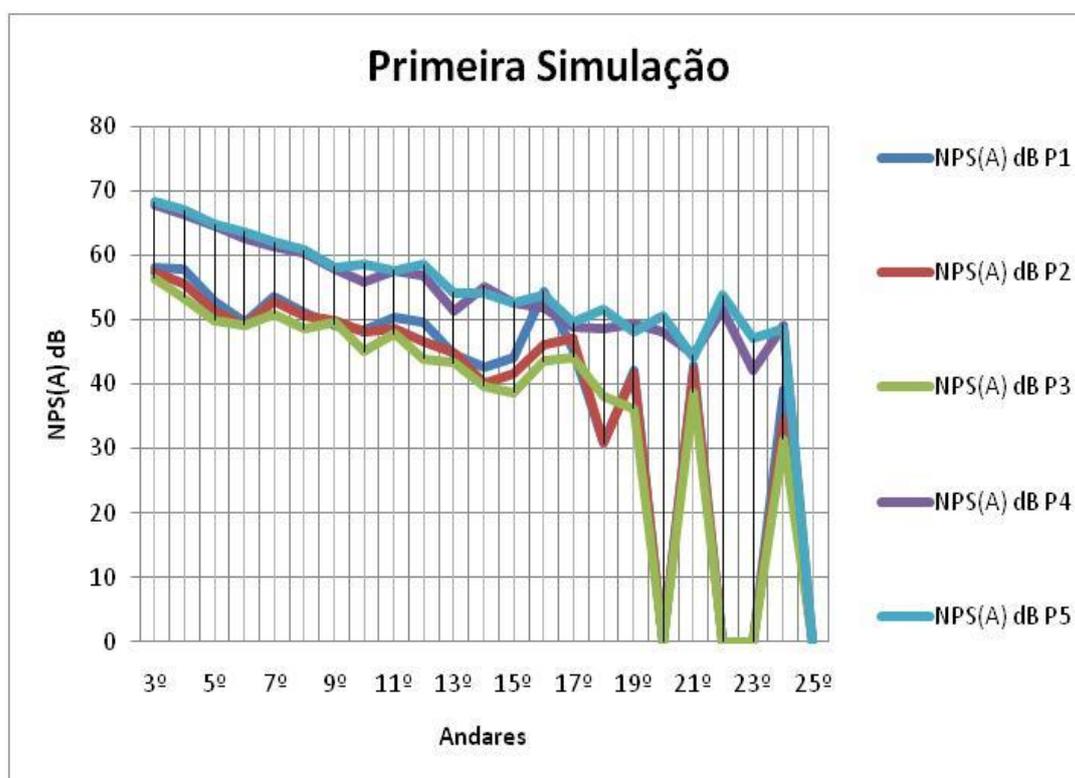
Tabela 6.1 – Resultados da 1ª simulação

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>58,2</b>	<b>57,4</b>	<b>56,4</b>	<b>67,7</b>	<b>68,3</b>	<b>3º</b>
57,9	55,7	53,4	66,3	67	4º
52,9	51,3	49,9	64,5	64,8	5º
49,5	49,1	49,1	62,6	63,6	6º
53,5	52,9	50,9	61,3	62	7º
51	50,5	48,6	60,3	60,8	8º
49,1	49,9	49,5	57,9	58,2	9º
48,4	48	45,1	55,9	58,7	10º
50,4	48,5	47,8	57,6	57,6	11º
49,7	46,5	43,9	56,9	58,5	12º
<b>44,7</b>	<b>44,8</b>	<b>43,3</b>	<b>51,4</b>	<b>54,1</b>	<b>13º</b>
42,5	40,1	39,7	55,1	54,2	14º
44	41,7	38,7	52,6	52,5	15º
54,4	46,1	43,6	51,9	53,8	16º
45,4	47,1	44,2	48,8	49,5	17º
30,8	30,8	38,2	48,6	51,5	18º
42,2	41,7	36,2	49,3	48,1	19º
0	0	0	48,2	50,6	20º
<b>42,8</b>	<b>42,2</b>	<b>38,7</b>	<b>44,6</b>	<b>44</b>	<b>21º</b>
0	0	0	51,5	53,8	22º
0	0	0	42	47	23º
39,2	34,6	31,5	49,2	48,6	24º
0	0	0	0	0	25º

Fonte: Próprio autor

A Fig. 6.9, mostra os resultados da Tab. 6.1 da primeira simulação.

Figura 6.9 – Resultados Numéricos para a primeira simulação



Fonte: Próprio autor

A Tab. 6.2, mostra uma grande discrepância dos resultados da primeira simulação realizada no *ODEON*, para os valores de *NPS*, em relação aos resultados experimentais medidos nos receptores de referência do 3º, 13º e 21º andares do EP25. A média geral de discrepância foi de 6,6, 15,6 e 19,5 dB(A) de  $L_{Aeq}$ , para o 3º, 13º e 21º andares, respectivamente.

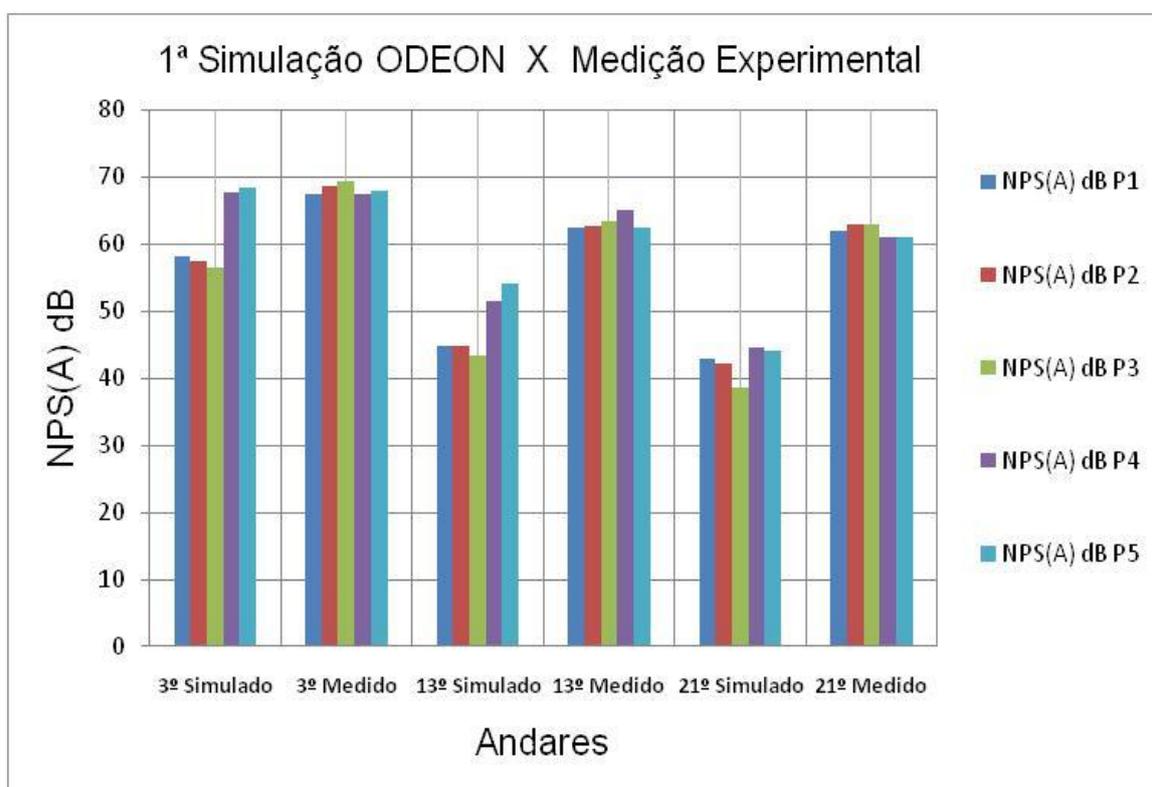
Tabela 6.2 – Comparação entre a primeira simulação e a medição experimental

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>58,2</b>	<b>57,4</b>	<b>56,4</b>	<b>67,7</b>	<b>68,3</b>	3º Simulado
67,4	68,6	69,3	67,5	67,9	3º Medido
<b>44,7</b>	<b>44,8</b>	<b>43,3</b>	<b>51,4</b>	<b>54,1</b>	13º Simulado
62,5	62,6	63,5	65,0	62,5	13º Medido
<b>42,8</b>	<b>42,2</b>	<b>38,7</b>	<b>44,6</b>	<b>44,0</b>	21º Simulado
62,0	63,0	63,0	60,9	61,1	21º Medido

Fonte: Próprio autor

A Fig. 6.10, apresenta os resultados da Tab. 6.2.

Figura 6.10 – Resultados da Tab. 6.2



Fonte: Próprio autor

#### 6.1.4 Segunda Simulação

Para a segunda simulação, foram efetuadas algumas modificações, a saber:

- A fonte linear teve seu comprimento aumentado de 1,0 para 95,0 m, valor correspondente ao comprimento da Rua Antônio Barreto, limitado pelo volume de controle;
- O número de raios acústicos emitidos pela fonte foi aumentado para 5.000.000 (cinco milhões).

Assim, foi possível realizar a segunda simulação das condições acústicas das áreas em estudo, no EP25.

O *ODEON* compilou os dados, em aproximadamente 18 minutos, com os resultados apresentados na Tab. 6.3.

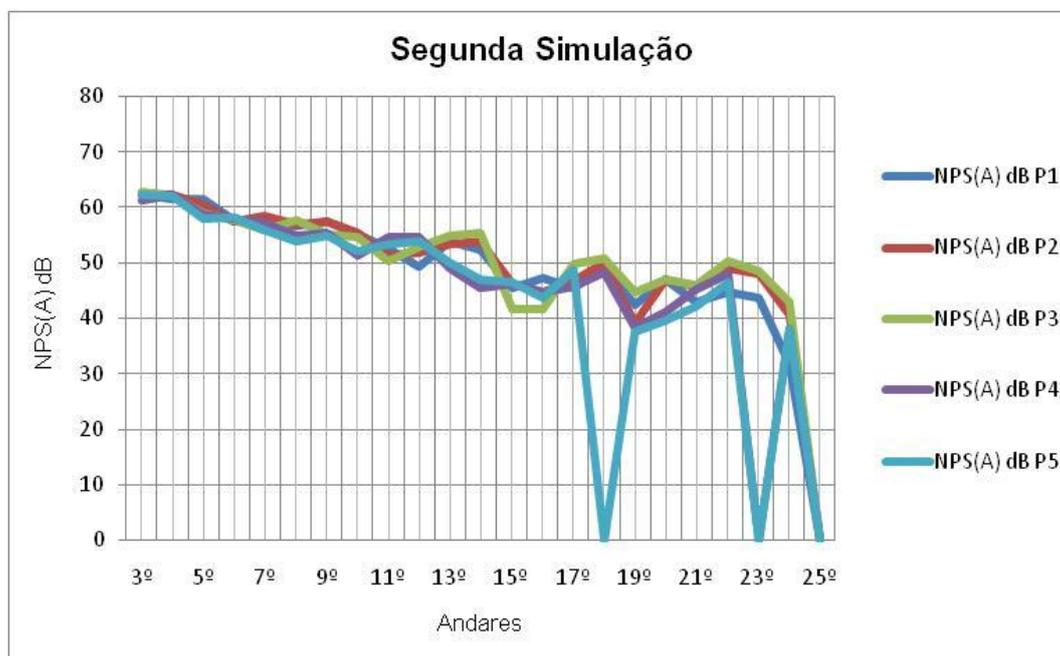
Tabela 6.3 – Resultados da 2ª simulação

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>62,3</b>	<b>62,4</b>	<b>62,7</b>	<b>61,3</b>	<b>62,2</b>	<b>3º</b>
61,6	62,2	62	62,2	61,9	4º
61,5	60,4	59	58,6	57,9	5º
57,7	57,5	57,8	57,9	58,2	6º
57,2	58,4	56	57,1	55,8	7º
56,7	56,9	57,6	54,9	53,9	8º
57,5	57,3	55,2	55,5	54,9	9º
55,1	55,3	54,6	51,4	52,1	10º
52,6	51,4	50,3	54,6	53,4	11º
49,4	51,8	52,8	54,7	53,8	12º
<b>53,8</b>	<b>53,4</b>	<b>55</b>	<b>49</b>	<b>50,1</b>	<b>13º</b>
52,3	53,9	55,5	45,4	46,9	14º
45,5	46,1	41,7	46,1	46,4	15º
47,2	44,6	41,7	44,6	43,8	16º
45,4	46,8	49,7	45,7	48,8	17º
49,3	50	50,8	48,2	44,5	18º
42,3	39,2	44,6	38,4	37,6	19º
47,1	47	47,1	41,1	39,5	20º
<b>43</b>	<b>45,7</b>	<b>45,9</b>	<b>45,3</b>	<b>42,2</b>	<b>21º</b>
44,6	48,9	50,2	47,9	46,5	22º
43,7	47,9	48,5	0	0	23º
31,8	40,7	42,9	38,2	38,1	24º
0	0	0	0	0	25º

Fonte: Próprio autor

A Fig. 6.11, mostra os resultados da Tab. 6.3 da segunda simulação.

Figura 6.11 – Resultados numéricos para a segunda simulação



Fonte: Próprio autor

A Tab. 6.4, mostra certa evolução de valores de *NPS* simulado *versus* experimental por andar, além de diminuição na discrepância dos resultados da segunda simulação realizada no *ODEON*, para os valores de *NPS*, em relação aos resultados experimentais medidos nos receptores de referência do 3º, 13º e 21º andares do EP25. A média geral de discrepância foi de 6,0, 11,0 e 17,6 dB(A) de  $L_{Aeq}$ , para o 3º, 13º e 21º andares, respectivamente.

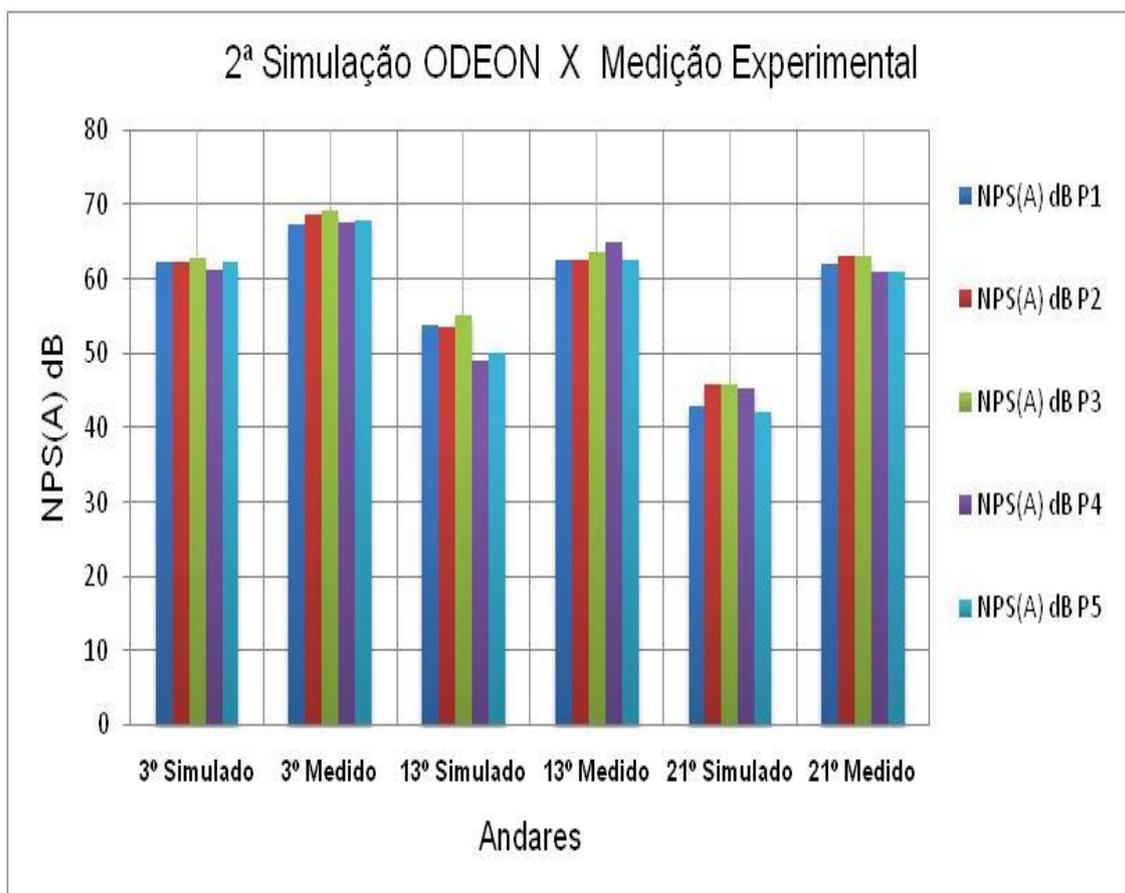
Tabela 6.4 – Comparação entre a segunda simulação e a medição experimental

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>62,3</b>	<b>62,4</b>	<b>62,7</b>	<b>61,3</b>	<b>62,2</b>	<b>3º Simulado</b>
67,4	68,6	69,3	67,5	67,9	3º Medido
<b>53,8</b>	<b>53,4</b>	<b>55,0</b>	<b>49,0</b>	<b>50,1</b>	<b>13º Simulado</b>
62,5	62,6	63,5	65,0	62,5	13º Medido
<b>43,0</b>	<b>45,7</b>	<b>45,9</b>	<b>45,3</b>	<b>42,2</b>	<b>21º Simulado</b>
62,0	63,0	63,0	60,9	61,1	21º Medido

Fonte: Próprio autor

A Fig. 6.12, apresenta os resultados da Tab. 6.4.

Figura 6.12 – Resultados da Tab. 6.4



Fonte: Próprio autor

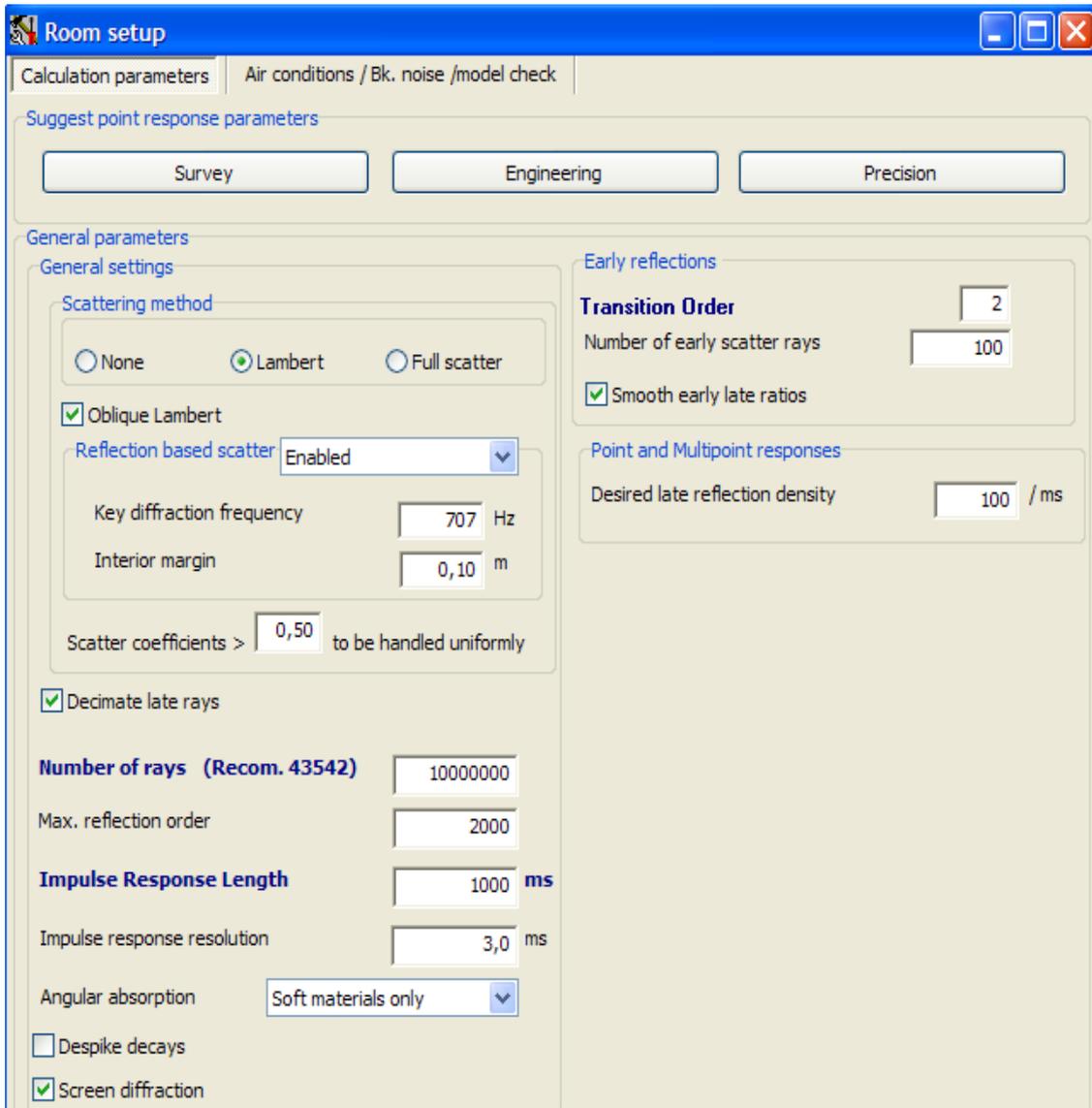
### 6.1.5 Terceira Simulação

Para a terceira simulação foram efetuadas cinco modificações nos valores dos parâmetros da fonte linear, usando a função *'Define a line source'*, a saber:

- O valor de  $NWS = 88,0$  dB/m foi preenchido na janela que indica dB/m detalhe este que havia passado despercebido até o momento;
- A altura  $z$  da fonte mudou para 0,5 m.
- O número de raios acústicos emitidos pela fonte foi aumentado para 10.000.000 (dez milhões), com precisão de engenharia.

A Fig. 6.13 mostra a janela do software para função Room Setup com as modificações citadas.

Figura 6.13 – Configuração em dez milhões de raios



Fonte: Próprio autor

- d) As bandas de nível de ajuste de frequências (+EQ), que funciona como um equalizador, foram preenchidas com valores obtidos a partir da diferença de  $NWS$  por banda de frequência calculadas analiticamente e subtraídas do valor de  $NWS = 88,0$  dB/m. Utilizando a Eq. 6.1, foi possível obter os valores de  $NWS_{freq}$  em oitavas de 63 Hz a 8 kHz, substituindo  $L_{A10}$  por  $NPS_{freq}$ . Dessa forma, os valores de  $NWS$  por banda de frequência mudaram automaticamente, conforme preenchimento de (+EQ) obtidos a partir de cálculo analítico, dado por:

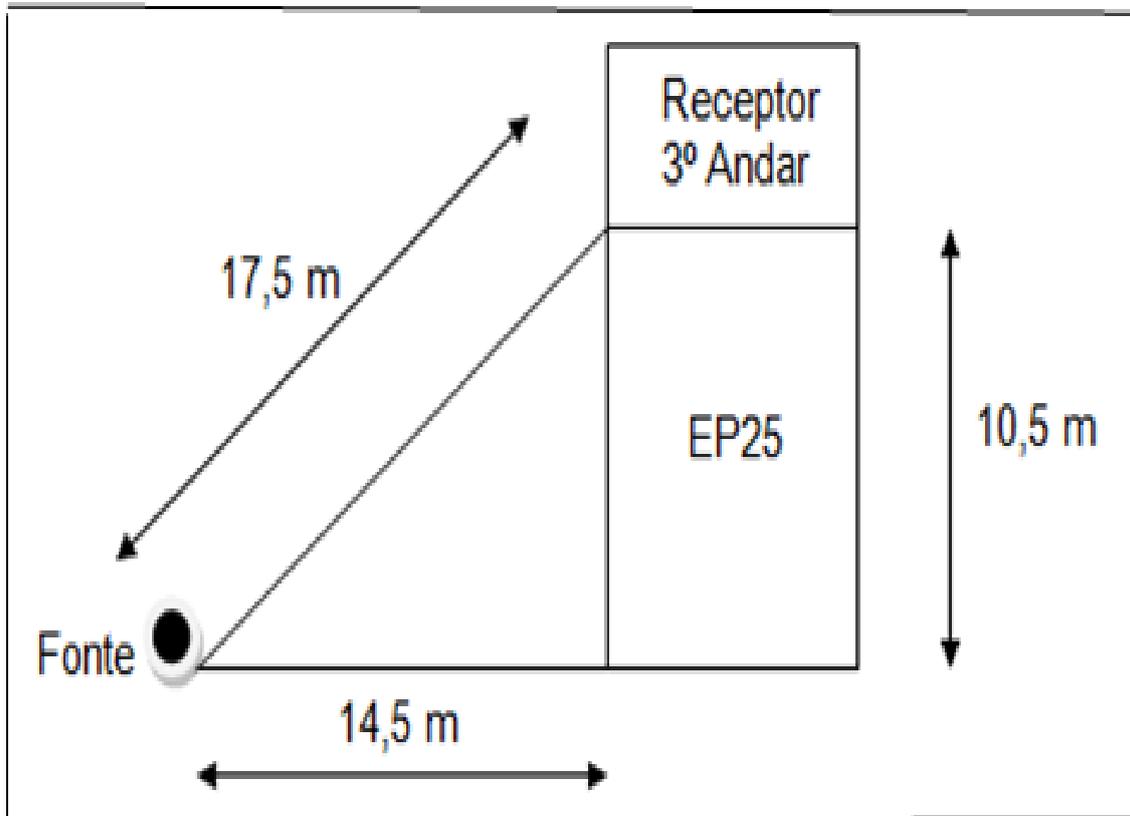
$$NWS_{freq} = NPS_{freq} + 10 \log r + 5 \quad (6.2)$$

Onde:

$NPS_{freq}$  é o nível de ruído de tráfego por banda de frequência;

$r$  é distância da fonte até o receptor no 3º andar, conforme mostrado na Fig. 6.14.

Figura 6.14 – Desenho esquemático mostrando a distância da fonte ao receptor no 3º andar



Fonte: Próprio autor

- e) Na segunda simulação, foi utilizado um coeficiente de espalhamento da fonte (*Scatter*) igual a 0, significando que os raios são emitidos pela fonte na direção perpendicular ao seu eixo. Assim, aproximando-se mais da realidade, mudou-se novamente o coeficiente de espalhamento para 1, tal que os raios passassem a ser emitidos em uma direção aleatória.

Assim, os valores foram obtidos com dados de  $L_{A10}$  e  $NPS_{freq}$ , ambos medidos na sacada do 3º andar e apresentados na Tab. 6.5, conforme segue

Tabela 6.5 – Resultados de medições de  $NPS_{freq}$  no 3º andar do EP25.

Freq (Hz)	NPS <sub>freq</sub> (dB)
63	69,3
125	64,1
250	61,0
500	59,9
1000	60,7
2000	56,0
4000	49,8
8000	44,6

Fonte: Próprio autor

Logo,

$$NWS_{63} = L_{A10, 63} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{63} = 69,3 + 10 \log 17,5 + 5 = 86,7 \text{ dBA}$$

$$NWS_{125} = L_{A10, 125} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{125} = 64,1 + 10 \log 17,5 + 5 = 81,5 \text{ dBA}$$

$$NWS_{250} = L_{A10, 250} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{250} = 61 + 10 \log 17,5 + 5 = 78,4 \text{ dBA}$$

$$NWS_{500} = L_{A10, 500} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{500} = 59,9 + 10 \log 17,5 + 5 = 77,3 \text{ dBA}$$

$$NWS_{1000} = L_{A10, 1000} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{1000} = 60,7 + 10 \log 17,5 + 5 = 78,1 \text{ dBA}$$

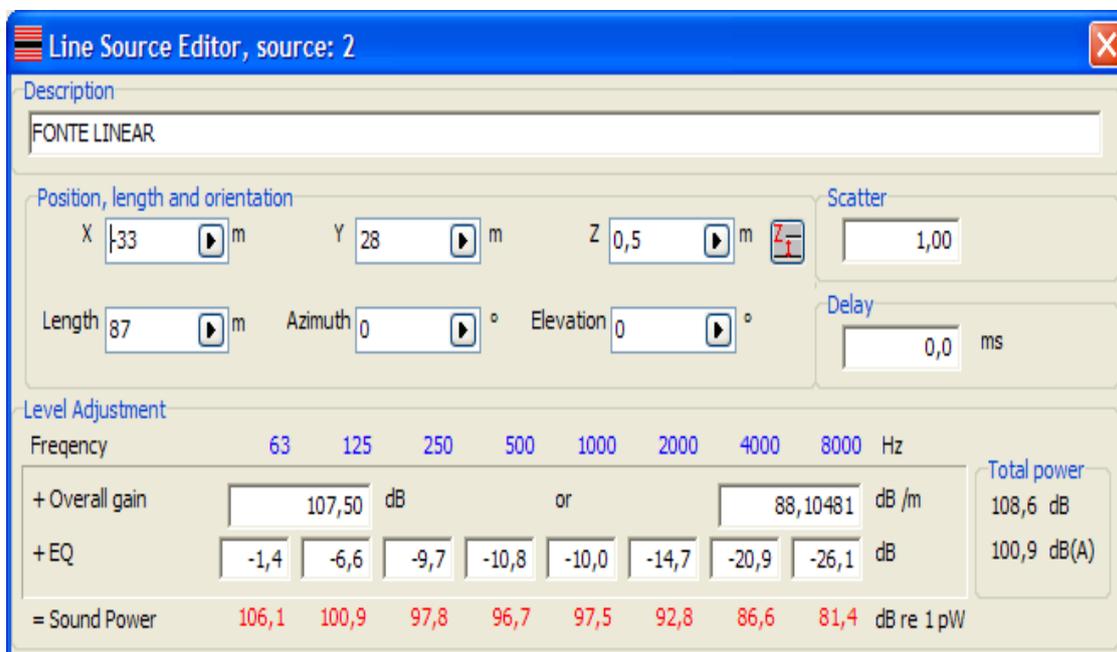
$$NWS_{2000} = L_{A10, 2000} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{2000} = 56 + 10 \log 17,5 + 5 = 73,4 \text{ dBA}$$

$$NWS_{4000} = L_{A10, 4000} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{4000} = 49,8 + 10 \log 17,5 + 5 = 67,2 \text{ dBA}$$

$$NWS_{8000} = L_{A10, 8000} + 10 \log 17,5 + 5 \rightarrow NWS_{8000} = 44,6 + 10 \log 17,5 + 5 = 62,0 \text{ dB}$$

A Fig. 6.15, apresenta a janela da função 'Define a line source' com as modificações efetuadas.

Figura 6.15 – Janela do software, com novo preenchimento



Fonte: Próprio autor

Assim, foi possível realizar a terceira simulação das condições acústicas das áreas em estudo, no EP25. O *ODEON* compilou os dados, em aproximadamente 36 minutos, com os resultados apresentados na Tab. 6.6.

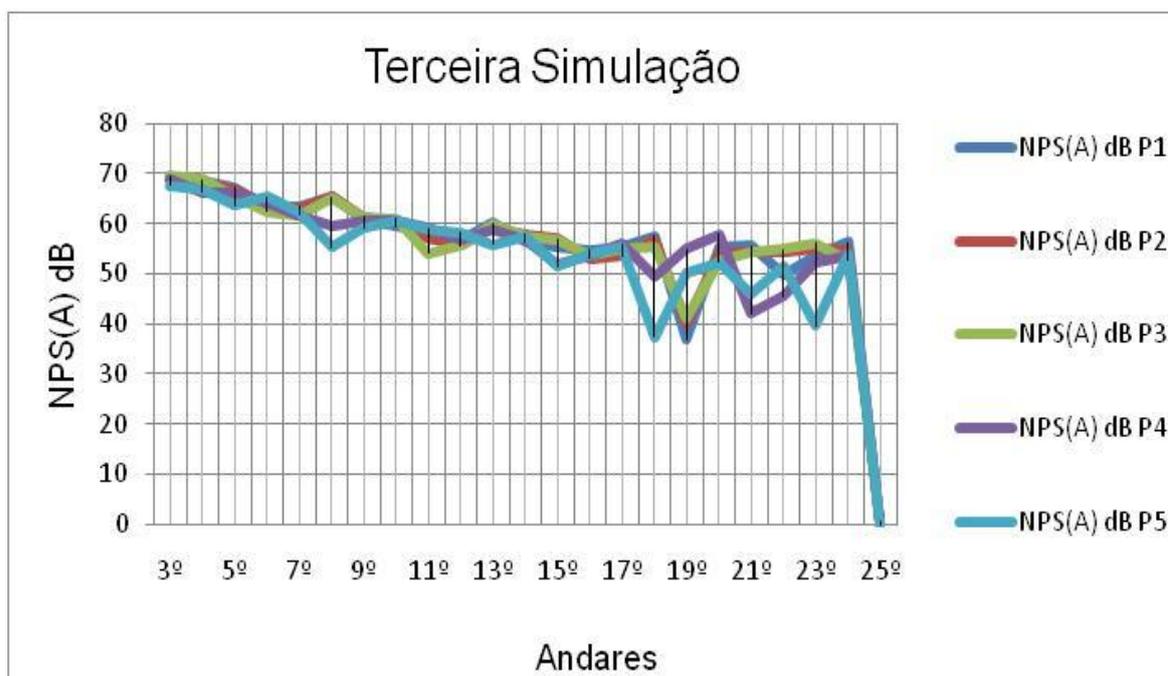
Tabela 6.6 – Resultados da 3ª simulação

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>69,3</b>	<b>68,9</b>	<b>69,6</b>	<b>68,8</b>	<b>67,6</b>	<b>3º</b>
68,5	68,2	68,9	66,3	66,9	4º
67,3	66,7	65,3	66,2	63,7	5º
63,2	63,7	62,4	64,2	65,4	6º
63,5	62,9	61,8	61,8	62,3	7º
65,4	65,3	65,1	59,4	55,2	8º
60,9	61,4	61,3	60,5	59,1	9º
59,4	60,6	61	60,6	60,6	10º
58,5	57	54,1	59,1	58,9	11º
56,6	55,6	55,8	56,7	58,2	12º
<b>60,1</b>	<b>59,2</b>	<b>59,9</b>	<b>58,7</b>	<b>55,8</b>	<b>13º</b>
56,3	57,9	57,6	56,8	57,5	14º
55,5	57,1	56,9	51,9	51,5	15º
54,8	53	53,7	53,8	54,1	16º
55,2	53,6	54,9	56	55,3	17º
57,6	56,8	55,3	49,4	37,3	18º
36,9	40	41	55	50	19º
55,4	54,2	52,6	57,9	52,3	20º
<b>55,7</b>	<b>54,2</b>	<b>54,5</b>	<b>42,1</b>	<b>46</b>	<b>21º</b>
49,8	54,4	54,9	45,6	51,7	22º
53,7	55,1	56,2	52,1	39,6	23º
56,3	54,7	52,6	53,5	53,9	24º
0	0	0	0,6	0	25º

Fonte: Próprio autor

A Fig. 6.16, mostra os resultados da Tab. 6.6 da terceira simulação.

Figura 6.16 – Resultados numéricos para a terceira simulação



Fonte: Próprio autor

A Tab. 6.7, mostra maior homogeneidade de valores de *NPS* simulado por andar, com diminuição na discrepância dos resultados da terceira simulação realizada no *ODEON*, para os valores de *NPS*, em relação aos resultados experimentais nos receptores de referência do 3º, 13º e 21º andares do EP25. A média geral de discrepância foi de 0,7, 4,5 e 11,5 dB(A) de  $L_{Aeq}$ , para o 3º, 13º e 21º andar, respectivamente.

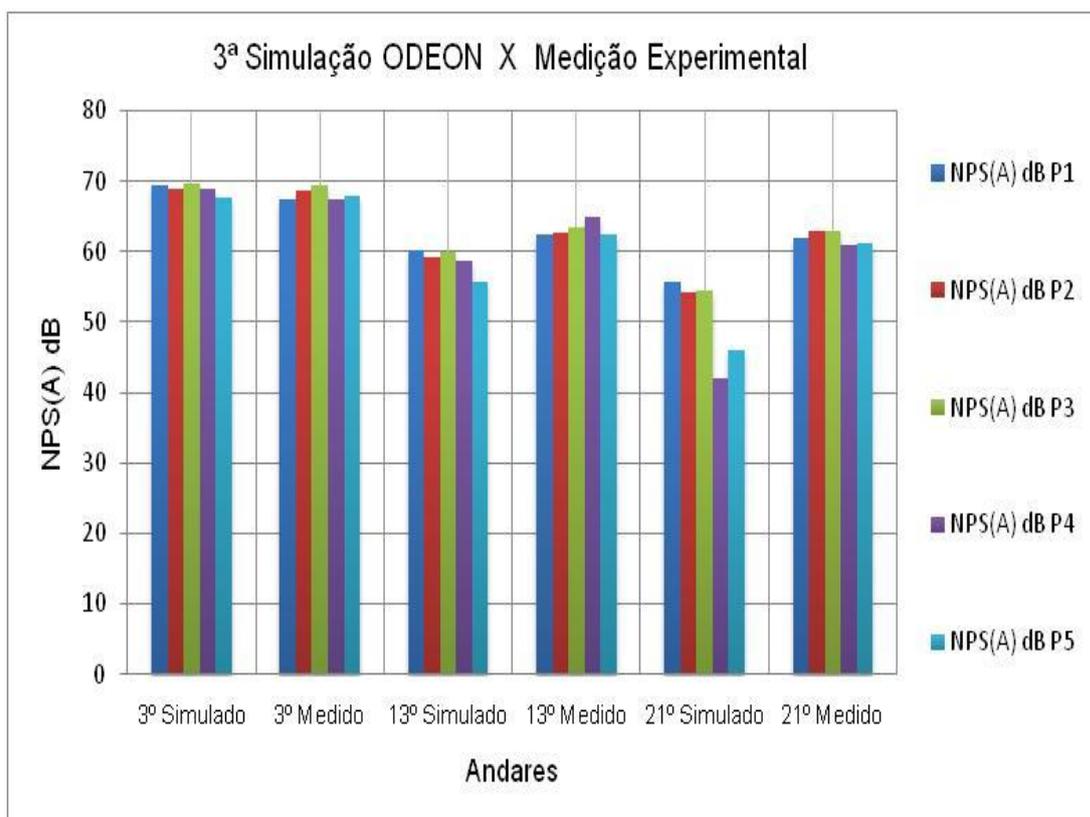
Tabela 6.7 – Comparação entre a 3ª simulação e a medição experimental

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>69,3</b>	<b>68,9</b>	<b>69,6</b>	<b>68,8</b>	<b>67,6</b>	<b>3º Simulado</b>
<b>67,4</b>	68,6	69,3	67,5	67,9	3º Medido
<b>60,1</b>	<b>59,2</b>	<b>59,9</b>	<b>58,7</b>	<b>55,8</b>	<b>13º Simulado</b>
<b>62,5</b>	62,6	63,5	65,0	62,5	13º Medido
<b>55,7</b>	<b>54,2</b>	<b>54,5</b>	<b>42,1</b>	<b>46,0</b>	<b>21º Simulado</b>
<b>62,0</b>	63,0	63,0	60,9	61,1	21º Medido

Fonte: Próprio autor

A Fig. 6.17, apresenta os resultados da Tab. 6.7.

Figura 6.17 – Resultados da Tab. 6.7



Fonte: Próprio autor

### 6.1.6 Interpretação dos Resultados

O total de simulações do modelo se aproximou de 20, com várias mudanças consideradas pertinentes para a tentativa de validação do mesmo. As três simulações apresentadas consistem num resumo do desenvolvimento do modelo, representando o pior resultado, o resultado mediano e o melhor resultado para as simulações 1, 2 e 3, respectivamente. Mesmo assim, todas as simulações encontram-se listadas no Apêndice 1 deste trabalho.

Assim, o resultado da primeira simulação do modelo anunciou claramente a necessidade de ajustes nos valores dos parâmetros utilizados. A grande discrepância apresentada nos resultados da compilação dos dados, com média de 6,6, 15,6 e 19,5 dB(A) de  $L_{Aeq}$ , para o 3º, 13º e 21º andar, respectivamente, em relação às medições experimentais, justificou tal necessidade.

Observou-se que os resultados do  $L_{Aeq}$  da primeira simulação, referentes aos 13º e 21º andares do EP25, em cada ponto, divergiram de forma muito acentuada em relação aos resultados das medições experimentais para os mesmos pontos.

A segunda simulação do modelo já mostrou uma pequena evolução nos resultados do  $L_{Aeq}$ , com 6,0, 11,0 e 17,6 dB(A), para os 3º, 13º e 21º andares, respectivamente. Tal evolução foi associada às mudanças de alguns valores, nos parâmetros utilizados na modelagem, como por exemplo, o aumento do número de raios acústicos emitidos e o aumento do comprimento da fonte para os limites do volume de controle, representando de forma mais real o número de veículos que trafegam no período determinado nas medições experimentais.

O aumento do comprimento da fonte proporcionou aos microfones receptores distribuídos ao longo dos andares do EP25, uma leitura mais homogênea da energia acústica emitida.

Observou-se novamente, que os resultados do  $L_{Aeq}$  da segunda simulação, referentes aos 13º e 21º andares do EP25, em cada ponto, continuaram a divergir de forma acentuada em relação aos resultados das medições experimentais para os mesmos pontos.

A terceira simulação do modelo já mostra uma convergência satisfatória entre os resultados simulados e experimentais para o 3º andar, com valores de **0,7**, 4,5 e 11,5 dB(A) de  $L_{Aeq}$ , para os **3º**, 13º e 21º andares, respectivamente.

Uma mudança no valor do parâmetro  $NWS/m$ , até então despercebida, contribuiu para a melhoria dos resultados. O valor calculado analiticamente, de  $NWS = 88,1$  dB/m foi corretamente preenchido na janela da função, o que propiciou a concordância entre valores medidos e simulados para o 3º andar do EP25.

Novas modificações, dessa vez para os valores calculados analiticamente, de  $NWS$  por banda de frequência, aumento da altura  $z$  da fonte para 0,5 m de sua posição inicial e o aumento do número de raios acústicos, emitidos pela fonte, para o valor máximo aceitável pelo *software* em 10.000.000, contribuiu para a aproximação dos resultados simulados em relação aos medidos experimentalmente.

Observou-se que os resultados da simulação para o 3º andar se aproximaram bastante dos resultados experimentais, fornecendo resultados bastante precisos para as primeiras reflexões, o mesmo não acontecendo para a média simulada nos 13º e 21º andares, com maior destaque para os resultados simulados no 21º andar do EP25, cujos valores médios apresentam-se ainda bastante divergentes dos obtidos nas medições experimentais.

Justificam-se os valores médios de 4,5 e 11,5 dB(A), referente aos 13º e 21º andares do EP25, como resultado da influência das fontes sonoras das vizinhanças, as quais não puderam ser inseridas no modelo, a fim de manter concisas suas dimensões.

Assim, uma vez que andares mais elevados serão mais sensíveis às perturbações das vizinhanças, observa-se que o modelo desenvolvido é coerente neste sentido, apresentando resultados convergentes para o 3º andar, além de uma divergência gradual, à medida que os andares se elevam, tal como esperado.

Dessa forma, e de posse dos resultados das três simulações, com seus respectivos ajustes, considera-se o modelo validado com base na terceira simulação, tendo como referência os resultados obtidos para a sacada do 3º andar do EP25.

## 6.2 APLICAÇÕES DO PROTÓTIPO E PARTIÇÕES

A utilização de tetos absorvedores de ruídos parece estar restrita a ambientes fechados, como por exemplo, estúdios, auditórios, salas de música, etc., da mesma forma é possível afirmar que a utilização de partições de vidros duplos e triplos em peitoris, portas e janelas de sacadas não surgem na concepção dos projetos de edificações, como é o caso das sacadas do EP25. Dessa forma e a partir dessas considerações, este tópico apresenta, em três situações de possível utilização, o protótipo absorvedor e as partições de vidros, ambos desenvolvidos e apresentados no capítulo 5 deste trabalho, aplicados aos tetos das sacadas e peitoris, portas e janelas do EP25, respectivamente. A Fig. 6.18, mostra o protótipo absorvedor com acabamento final para aplicação.

Figura 6.18 – Protótipo absorvedor em módulo dupla face

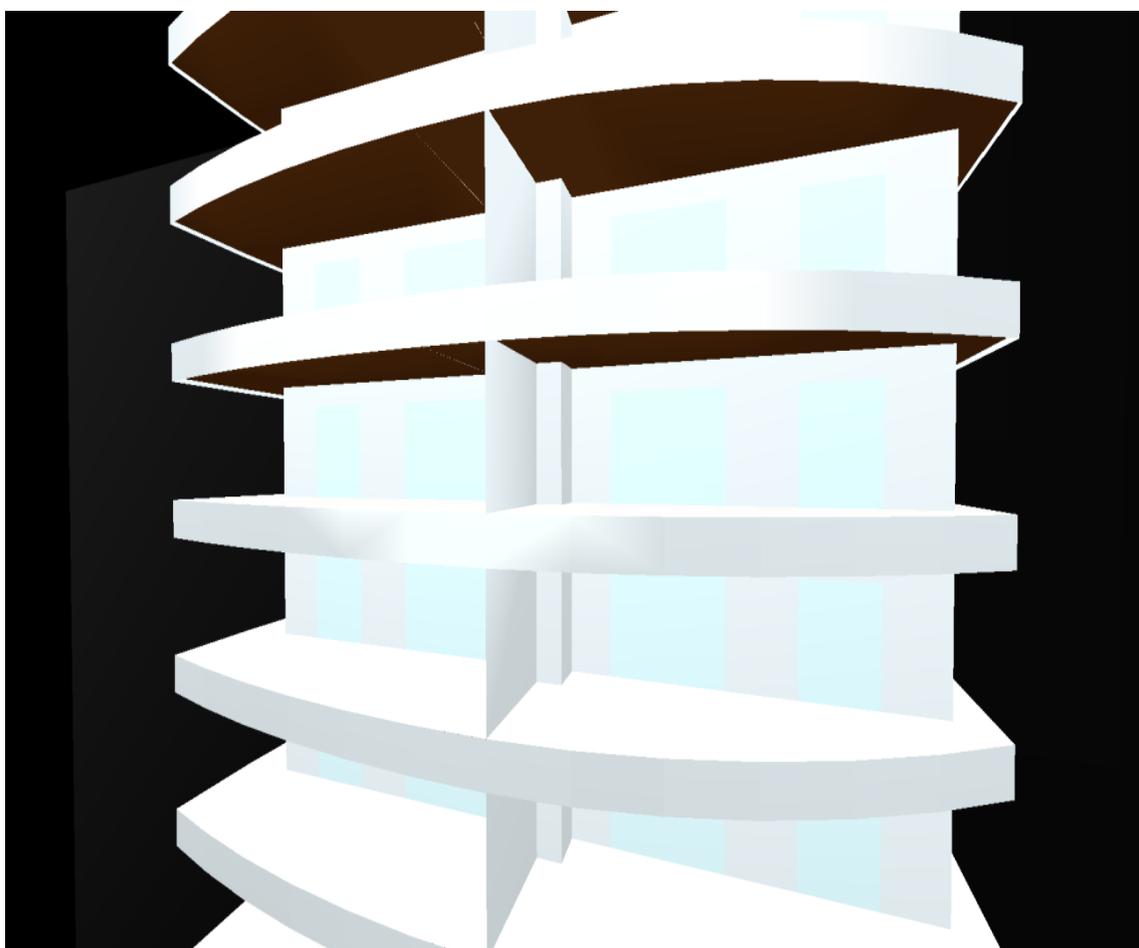


Fonte: Próprio autor

### 6.2.1 Primeira Simulação com Utilização de Teto Absorvedor, Peitoril de Metal em Grade Vazada e Partições de Vidro Triplo nas Portas e Janelas

Na primeira simulação utilizou-se peitoril vazado, do tipo grade de metal, bastante comum em sacadas de edificações, simulando uma situação de transparência acústica. Nas portas e janelas das sacadas utilizaram-se as partições de vidro triplo e no teto utilizou-se o protótipo absorvedor. A Fig. 6.19, mostra a imagem parcial do modelo com os peitoris vazados, portas e janelas de vidro triplo e teto absorvedor.

Figura 6.19 – Vista frontal parcial do EP25 modelado no ODEON



Fonte: Próprio autor

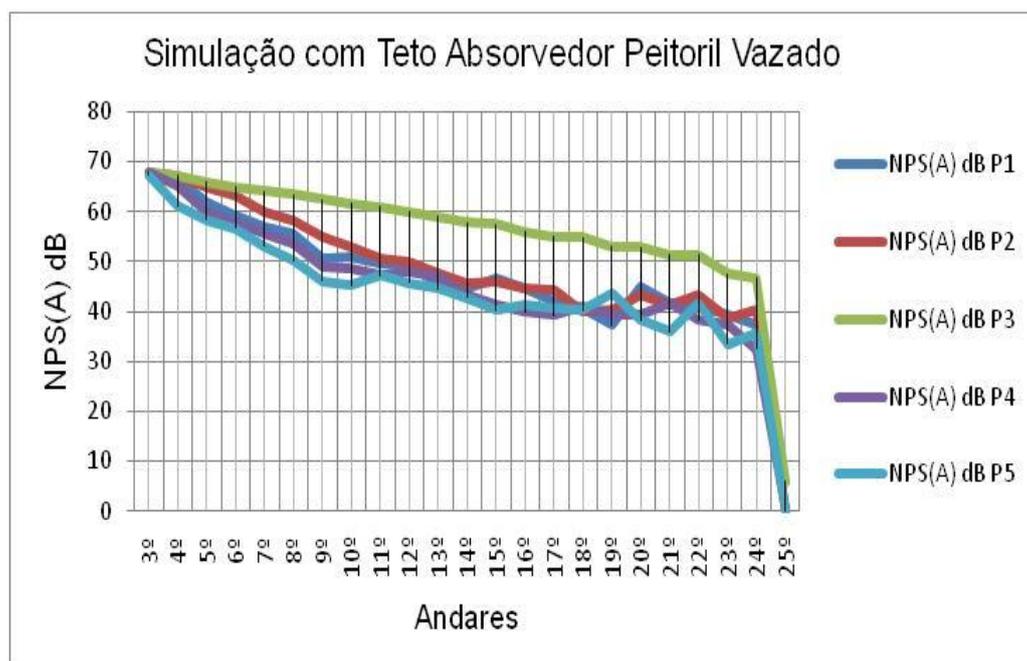
A Tab. 6.8 e a Fig. 6.20, apresentam os resultados da primeira simulação utilizando peitoril vazado, portas e janelas de vidro triplo e teto absorvedor.

Tabela 6.8 – Resultados da primeira simulação com peitoril vazado

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>68,0</b>	<b>68,0</b>	<b>68,0</b>	<b>67,7</b>	<b>67,3</b>	3º
66,6	67,2	67,2	65,2	61,1	4º
61,8	64,8	66,0	60,0	58,3	5º
59,3	63,1	65,0	57,8	56,7	6º
56,9	59,8	64,2	55,5	53,1	7º
55,7	58,4	63,4	53,6	50,2	8º
50,6	54,9	62,5	48,9	46,0	9º
50,8	52,9	61,6	48,6	45,3	10º
49,5	50,7	60,9	47,4	47,3	11º
49,3	50,0	59,9	47,9	45,7	12º
<b>45,8</b>	<b>47,8</b>	<b>59,0</b>	<b>47,0</b>	<b>44,5</b>	13º
44,5	45,5	57,8	43,2	42,8	14º
46,7	46,0	57,5	41,4	40,3	15º
44,5	44,7	56,0	40,0	41,4	16º
42,0	44,4	55,0	39,2	40,8	17º
40,7	40,1	54,9	40,9	40,5	18º
37,2	40,2	53,0	39,5	43,5	19º
45,1	43,2	52,9	39,3	38,3	20º
<b>41,8</b>	<b>41,3</b>	<b>51,3</b>	<b>41,8</b>	<b>36,0</b>	21º
41,1	43,2	51,4	38,2	41,6	22º
39,2	38,7	47,6	37,5	33,4	23º
37,3	40,5	46,7	32,4	35,6	24º
0	0	0	0	0	25º

Fonte: Próprio autor

Figura 6.20 – Gráfico da primeira simulação com partições e protótipo



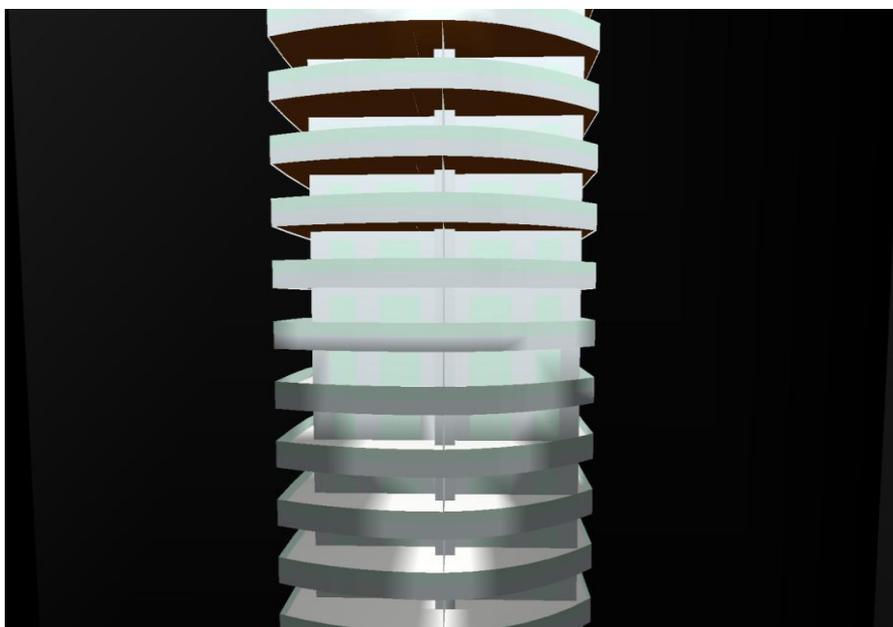
Fonte: Próprio autor

A primeira simulação do modelo validado com a utilização do protótipo absorvedor aplicado ao teto das sacadas do EP25 apresentou os resultados mostrados na Tab. 6.8. A média de atenuação do NPS com a configuração de peitoril vazado, portas e janelas de vidro triplo e teto absorvedor foi de 1,0 dB (A) para o 3º andar.

### **6.2.2 Segunda Simulação com Utilização de Teto Absorvedor, Peitoris Rebaixados e Partições de Vidro Triplo nas Portas e Janelas**

Na segunda simulação utilizou-se peitoril de vidro triplo com vazamento nos flancos, rebaixados em 0,30 m de sua altura normalizada de 1,0 m, também, bastante comum em sacadas de edificações. Nas portas e janelas das sacadas utilizaram-se as partições de vidro triplo e no teto utilizou-se o protótipo absorvedor. A Fig. 6.21, mostra a imagem parcial do modelo com os peitoris rebaixados para 0,70 m, portas e janelas de vidro triplo e teto absorvedor.

Figura 6.21 – EP25 com peitoril rebaixado



Fonte: Próprio autor

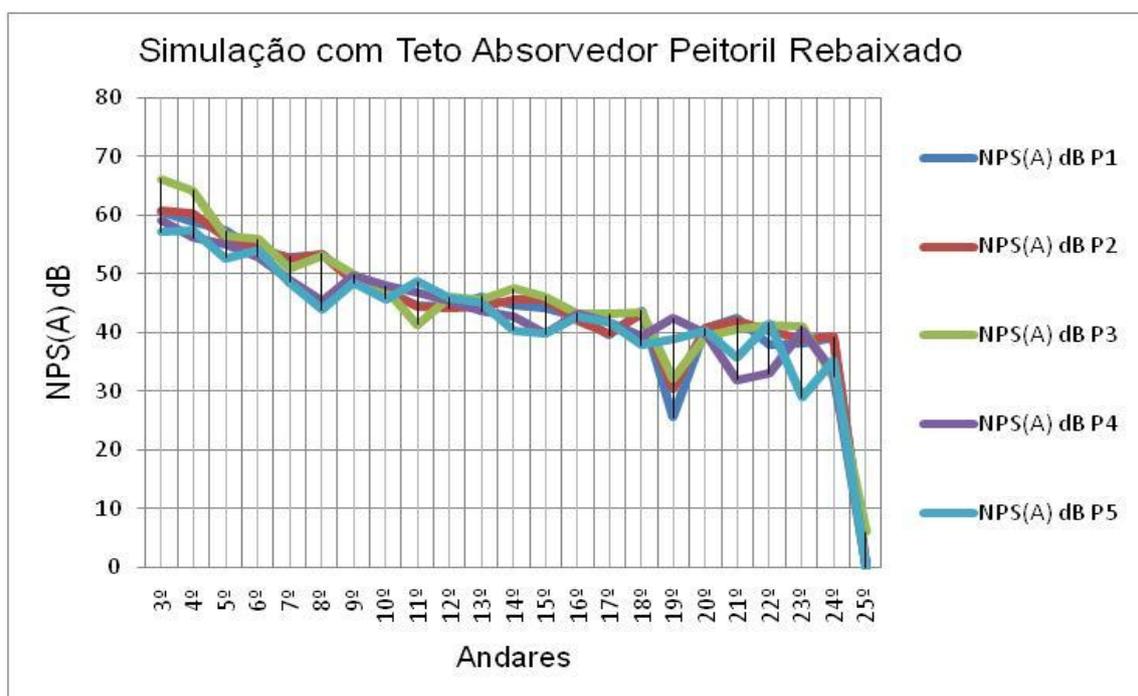
A Tab. 6.9 e a Fig. 6.22, apresentam os resultados da segunda simulação utilizando peitoril rebaixado, portas e janelas de vidro triplo e teto absorvedor.

Tabela 6.9 – Resultados da segunda simulação com peitoril rebaixado

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>61,5</b>	<b>62,4</b>	<b>66,6</b>	<b>59,9</b>	<b>59,6</b>	<b>3º</b>
61,6	62,2	66,4	58,8	58,8	4º
57,1	58,1	64,4	54,7	53	5º
55,5	56,6	63,8	53,2	53,7	6º
51,8	52,7	60,7	50,3	51,8	7º
53,1	52	58,7	48,4	46,7	8º
50,1	50,3	56	47,8	47,3	9º
48,7	48,3	53,6	48	42,8	10º
46,4	46,4	54	47,9	43,8	11º
46,4	47,3	49,4	47,3	45,4	12º
<b>45,8</b>	<b>46,1</b>	<b>48,9</b>	<b>45</b>	<b>43,3</b>	<b>13º</b>
44,4	46,9	42,4	46,9	45,4	14º
43,4	46,2	44,7	41	37,9	15º
43,6	41,6	43,4	39,3	36,6	16º
43,8	42,3	41,5	36,1	40,7	17º
42,2	41,1	42,9	35,2	38,6	18º
41,8	43,3	41,8	38,2	43	19º
38,4	39,2	42,2	14,4	31,7	20º
<b>38,2</b>	<b>41,6</b>	<b>43,8</b>	<b>43,7</b>	<b>39,6</b>	<b>21º</b>
40,3	40,7	42,4	37,7	33,7	22º
36	33,1	35,6	34,3	34,1	23º
39,1	41,6	41,4	40,6	39,2	24º
0	0	6	0	0	25º

Fonte: Próprio autor

Figura 6.22 – Gráfico da segunda simulação com partições e protótipo



Fonte: Próprio autor

A segunda simulação do modelo validado com a configuração de peitoril de vidro triplo e vazamento nos flancos, rebaixados em 0,30 m de sua altura normalizada de 1,0 m apresentou os resultados mostrados na Tab. 6.9. A média de atenuação do NPS com essa nova configuração foi de 6,84 dB (A) para o 3º andar.

### 6.2.3 Terceira Simulação com Utilização de Teto Absorvedor e Partições de Vidro Triplo nos Peitoris, Portas e Janelas

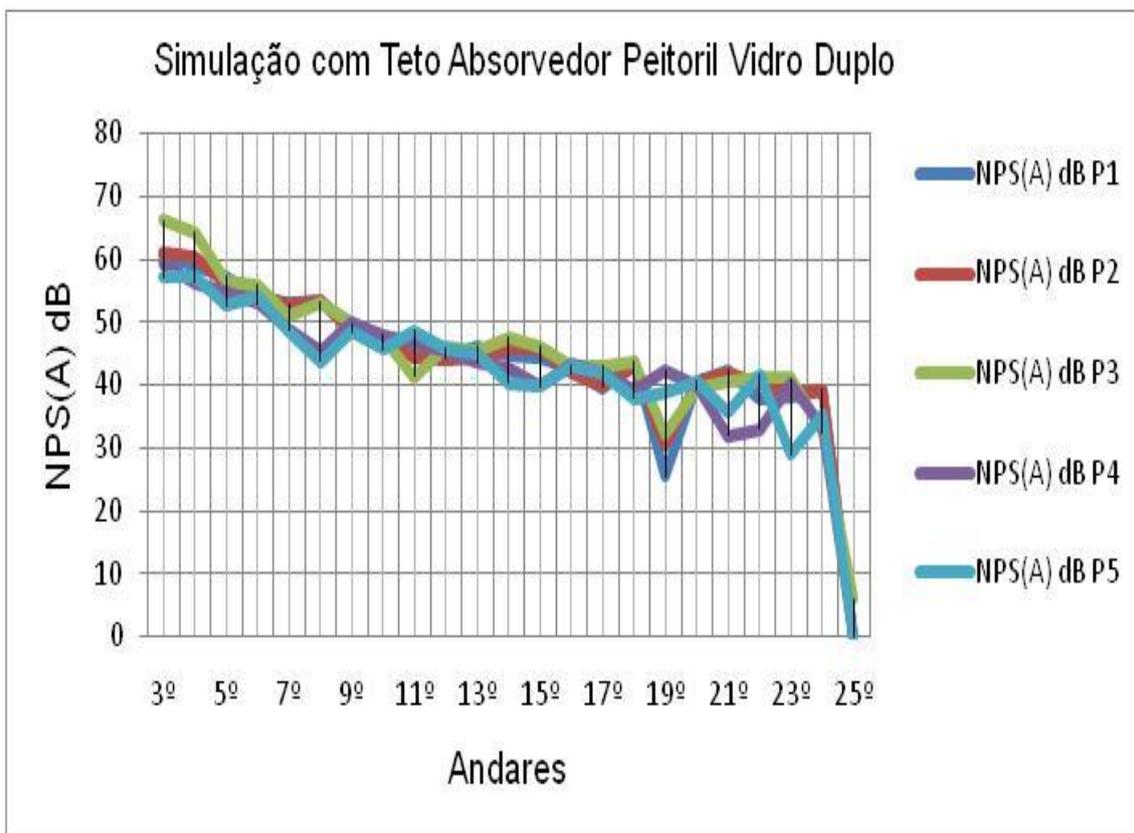
Na terceira simulação utilizou-se peitoril de vidro triplo com altura normalizada de 1,0 m, sem vazamento de flancos. Nas portas e janelas das sacadas utilizaram-se as partições de vidro triplo e no teto utilizou-se o protótipo absorvedor. A Tab. 6.10 e a Fig. 6.23, apresentam os resultados da terceira simulação utilizando peitoril normalizado, portas e janelas de vidro triplo e teto absorvedor.

Tabela 6.10 – Resultados da terceira simulação com peitoril normalizado

NPS dB (A) P1	NPS dB (A) P2	NPS dB (A) P3	NPS dB (A) P4	NPS dB (A) P5	Andar
<b>60,6</b>	<b>60,9</b>	<b>66,1</b>	<b>59,2</b>	<b>57,1</b>	<b>3º</b>
58,9	60,2	64,2	56,2	57,3	4º
57,3	56,2	56,5	54,9	52,6	5º
53,9	54,5	55,9	52,9	54,1	6º
52,9	52,7	50,8	49	48,6	7º
53,3	53,4	53,1	45,3	43,8	8º
48,9	48,7	49,9	49,8	48,4	9º
46,7	47,4	47,4	48	45,6	10º
44,6	44,5	41,3	46,8	48,7	11º
44,4	44,1	46	45,4	45,8	12º
<b>46,2</b>	<b>44,5</b>	<b>45,5</b>	<b>43,6</b>	<b>45</b>	<b>13º</b>
44,6	45,6	47,5	42,7	40,3	14º
44,2	45,7	46,2	39,7	39,8	15º
42,7	41,9	43,1	43,2	42,8	16º
39,5	39,9	43,1	41,8	41,8	17º
43,7	43,1	43,5	39,3	37,8	18º
25,5	30,4	32,2	42,4	38,8	19º
40,7	40,7	39,4	39,9	40,4	20º
<b>42,4</b>	<b>41,9</b>	<b>40,5</b>	<b>31,9</b>	<b>35,7</b>	<b>21º</b>
37,9	40,2	41,2	33	41,6	22º
38,1	38,9	41,1	40,2	28,9	23º
39,1	39,3	32,4	33,2	35,2	24º
0	0	6	0	0	25º

Fonte: Próprio autor

Figura 6.23 – Gráfico da terceira simulação com partições e protótipo



Fonte: Próprio autor

A terceira simulação do modelo validado com a configuração de peitoril de vidro triplo sem vazamento nos flancos apresentou os resultados mostrados na Tab. 6.10. A média de atenuação do NPS com essa nova configuração foi de 8,0 dB (A) para o 3º andar.

#### 6.2.4 Interpretação dos Resultados

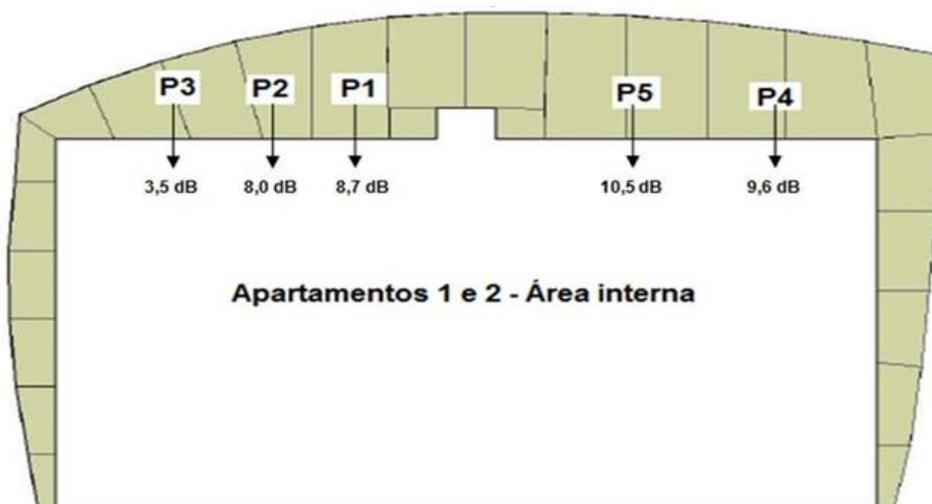
Na primeira simulação observou-se uma baixa atenuação de NPS nas sacadas. Esse fato deve-se a transparência dos peitoris vazados utilizados. O protótipo aplicado ao teto não foi eficaz para essa primeira configuração considerando que uma atenuação de 1,0 dB (A) é pouco perceptível.

Na segunda simulação já é observada uma evolução considerável na atenuação do NPS nas sacadas. Tal fato deve-se à nova configuração do conjunto protótipo e partições. A utilização de peitoris em vidro triplo rebaixados em 0,30 m de sua altura normalizada parece ter contribuído para a diminuição do NPS.

Os resultados da terceira simulação proporcionados pela aplicação do protótipo e peitoril de vidro triplo sem vazamento de flancos apresentaram valores de atenuação considerados satisfatórios. O desempenho do conjunto teto absorvedor e partições de vidro triplo simulado no 3º andar do EP25 pode ser considerado muito próximo do que se pode esperar em uma situação real de aplicação.

Observando os resultados da terceira simulação do conjunto em cada um dos cinco pontos estudados, P1, P2, P3, P4 e P5, pode-se perceber que a atenuação aumenta conforme a área de cada ponto também aumenta. A Fig. 6.24, mostra o desenho das sacadas com os cinco pontos do 3º andar e seus respectivos valores simulados de atenuação.

Figura 6.24 – Aumento da atenuação com o aumento da área da sacada



Fonte: Próprio autor

Ressalta-se que os resultados simulados nos 13º e 21º andares e apresentados na Tab. 6.9 apresentam precisão reduzida, relativamente aos resultados para o 3º, uma vez que a validação do modelo demonstrou que para estes andares, mais elevados, os resultados demonstram uma maior dependência do ruído produzido nas quadras vizinhas, o que não foi considerado nas simulações por questões de limitação do modelo.

## CAPÍTULO 7

### 7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou, detalhadamente, os resultados da investigação do comportamento acústico de elementos de edificações instalados em áreas externas de um prédio modelo de 25 andares. Tal edificação encontra-se em situação de desconforto acústico devido à interferência de ruído de tráfego em suas intermediações.

Assim, as soluções mitigadoras estudadas e desenvolvidas no presente estudo mostraram que a possibilidade de melhoria no desconforto causado pelo ruído de tráfego em tais situações é real.

O período escolhido para as medições obedeceu todos os critérios das normas utilizadas. Os horários de maior fluxo de veículos observados e tomados para as medições coincidiram com o descanso, após o almoço, dos trabalhadores da edificação em questão e suas saídas de fim de expediente, respectivamente. Portanto, as medições não tiveram nenhuma interferência destrutiva significativa proveniente das obras do prédio em construção.

As partições de vidros desenvolvidas e o protótipo de um teto absorvedor acústico para utilização em sacadas de edificações foram ensaiados nas mini câmaras acústicas do laboratório do GVA, buscando seguir as normas pertinentes, apesar da limitação imposta pelo tamanho reduzido das câmaras.

Foi apresentado o desenvolvimento de uma mini câmara geminada, aperfeiçoando em alguns aspectos a câmara existente no laboratório do GVA. Esta mini câmara foi utilizada para os ensaios de perda de transmissão de partições de vidros duplos, e triplos laminados.

Os resultados dos ensaios realizados mostraram uma grande eficiência de isolamento acústico por banda de frequência nas partições de vidro, com destaque para a partição de vidros duplos. Esta última mostrou resultados expressivos em comparação com as partições de vidros laminados triplos. Na discussão dos resultados, recomendou-se o cuidado na construção de esquadrias que utilizem essas partições, de tal forma a minimizar os vazamentos de ruídos pelos flancos, muito comuns em esquadrias comerciais.

O uso de vedações específicas como, por exemplo, borracha de neoprene, contribui de maneira significativa para a diminuição de tais vazamentos.

Foi realizada uma modelagem acústica da edificação modelo utilizando o *software* ODEON. A modelagem da edificação seguiu critérios rigorosos em sua fase de validação, com aproximadamente 20 simulações distribuídas em quatro meses de trabalho.

O resultado validado foi considerado satisfatório, com valores próximos das medições, particularmente para o 3º andar. Os resultados de atenuação sonora com a utilização do conjunto protótipo partições de vidro apresentaram uma diminuição nos níveis de ruídos que podem penetrar no interior dos apartamentos do EP25, além de maior redução, primeiramente, do NPS de suas sacadas.

O tema desenvolvido no presente estudo é de essencial importância para melhoria da qualidade de vida dos usuários de edificações sujeitas ao ruído de tráfego e alerta para a possibilidade real de utilização de materiais com bons níveis de isolamento e absorção acústica nessas edificações.

Em uma análise final, este trabalho deverá contribuir para a conscientização dos profissionais em construir edificações mais adequadas, do ponto de vista de seu desempenho acústico, considerando o problema do ruído de tráfego proposto, o que caracteriza um progresso significativo no campo da construção civil e dessa forma, poderá fornecer aos órgãos financiadores subsídios convincentes para o investimento na melhoria dessas edificações.

## 7.2 RECOMENDAÇÕES

É de fundamental importância que a confecção de portas e janelas, que utilizem a técnica das partições desenvolvidas neste trabalho, respeite os rígidos critérios de isolamento de seus flancos, a fim de evitar vazamentos de ruído para o interior do ambiente. Isso é possível, já que existem no mercado nacional, empresas especializadas na construção desses elementos, com custos viáveis.

Recomenda-se também, a utilização de portas e janelas afastadas das profundidades menores das sacadas, quando estas possuírem desenho como

os do EP25, já que a atenuação de ruído na região de menor profundidade é comprovadamente baixo.

### 7.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Dentre as principais sugestões para continuação deste trabalho, propõem-se os seguintes temas:

- Desenvolvimento de esquadrias de alumínio para suporte de partições de vidro duplo e vidro triplo laminado – portas e janelas acústicas.
- Desenvolvimento de forros absorvedores acústicos para ambientes internos em residências.
- Estudo da modelagem acústica de edificações com mais de 25 andares utilizando outras abordagens numéricas.

## REFERÊNCIAS

ALVES FILHO, J.M. ***Influência da Composição do Tráfego Sobre o Ruído Gerado por Rodovias***. 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR10151: 2000 Acústica – ***Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade***. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) NBR 10152 2004 - ***Níveis de ruído para conforto acústico***. Rio de Janeiro, 2004.

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

CARDOSO, Helder Fábio Santos. ***SOLUÇÕES NUMÉRICAS DE CONTROLE DE RUÍDO EM USINAS HIDRELÉTRICAS DA CHESF***. 2010. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica)- Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica, Pará, 2010.

CALIXTO, A. ***O Ruído gerado pelo tráfego de veículo em “Rodovias – Grandes Avenidas” Situadas dentro do Perímetro Urbano de Curitiba, Analisado sob Parâmetros Acústicos Objetivos e seu Impacto Ambiental***. 2002, 125 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2002.

COELHO, J. L. B.; VALADAS, B.; GUEDES, M. ***Ruído ambiente em Portugal***. Revista Acústica e Vibrações, n. 18, p. 17-32, 1996.

COSTA, Ennio Cruz. ***Acústica Técnica***. São Paulo: Blucher, 2003.

EEA 2001 Traffic noise, exposure and annoyance. Agência Europeia do Ambiente, Kongens Nytorv 6, DK - 1050 Copenhagen K, Dinamarca - The European Environment Agency (EEA) is an agency of the European Union

FUJIMOTO, Antonio Katsushi. ***Estudo da qualidade acústica de salas residenciais para uso de sistemas de áudio e vídeo***. 2004. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2004.

GERGES S. N. Y. Ruído. ***Fundamentos e Controle***. Florianópolis: [s.n], 1992.

GOMES. M. H. A. ***Determination of the acoustical random-incidence scattering coefficient***. D. Se. Thesis. Federal University of Santa Catarina, 2002.

GUEDES, Reginaldo Cascaes. ***Projeto e Construção de uma Câmara Reverberante em Escala Reduzida para a Caracterização Acústica de Materiais Absorvedores***. 2007. 130 f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

HASSAL J. R, ZAVERI, K. ***Acoustic Noise Measurement***. 4. ed. [s.l.: s.n.],1979.

HOOVER, R. M., ***Tree zones as barriers for control of noise due to aircraft operation***, [s.l.]: Bult; Newman. Inc, Report 844, 1961.

ISHIYAMA, T.; HASHIMOTO, T. ***The Impact of Sound Quality on Annoyance Caused by Road Traffic Noise***: An Influence of Frequency Spectra on Annoyance. Japan: JSAE Review, v. 21, p. 225-230, 2000.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 140 – ***Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms***, 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO 354 –  
**Acoustics – Measurement of Sound Absorption in Reverberation Rooms**,  
1999.

JACOBSEN, Finn. **An Overview of the Sources of Error in Sound Power Determination Using the Intensity Technique**. [s.l.]: Applied Acoustics, v. 50, n. 2, p. 155-166, 1997.

KOYASU, M. and YAMASHITA M., **Scale model experiments in noise reduction by acoustic barrier of a straight line source**. [s.l.]: Appl. Acoust. v. 6, p.232-242, 1973.

KRAGH, J. Anderson B. and JAKOBSEN, J., **Environmental noise from industrial plants: general prediction method**. [s.l.]: Danish Acoustic Lab., Report n. 32, 1982.

KURZE, U. J.; Anderson, G. S. **Sound attenuation of Barriers**. [s.l.]: Appl. Acoust. v. 4, p.35-53, 1971.

LEÃO, Antônio Jorge de Almeida. **ACÚSTICA DE EDIFÍCIOS**: recomendações técnicas-práticas para a concepção de edifícios escolares e de habitação. 1994. Dissertação (Mestrado em Construção de Edifícios)- Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Gabinete de Construções Cívicas.

MELO, Gustavo da Silva Vieira de. **Measurement and Prediction of Sound Absorption of Room Surfaces and Contents at Low Frequencies**. 2002. Tese submetida à Universidade Federal de Santa Catarina (Doutorado em Engenharia Mecânica), Santa Catarina, 2002.

N, Ferguson J. **Transport in London and the Implications for Health**. Soderland: McCarthy M. 1999.

NUNES, Maria Fernanda de O. **Estudo do ruído de tráfego veicular urbano em interseções semaforizadas no centro de Santa Maria**. Santa Maria:

CPGEC/UFSM, 1998. 75p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 1998.

OCDE. ***International Road Traffic and Accident Database***, Abr. 2002.

ODEON, Help. ***ODEON 10.1 Combined. Software***, Universidade Técnica da Dinamarca, 2009.

ODEON, ROOM ACOUSTICS PROGRAM. **User Manual: Industrial, Auditorium and Combined Editions. Version 9.1.** 2008.

ÖHRSTRÖM, E. Effects of Low Levels of Road Traffic Noise During the Night: A Laboratory Study on Number of Events, Maximum Noise Levels and Noise Sensitivity. Sweden. **Journal of Sound and Vibration**, v. 179, n. 4, p. 603-615, 1995.

Portal da Prefeitura Municipal de Belém – CTBEL. **Companhia de Transportes do Município de Belém** - Prefeitura Municipal de Belém  
Coordenação de Comunicação – COMUS.

PULSE. **Manual: Getting Starded** *Brüel & Kjaer*. [s.l.: s.n.], 2003.

ROTT, João A. A. **Mapa simplificado de ruído para a cidade de Porto Alegre**. 1995. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

SANCHO, V. M., SENCHERMES, A. G. **Curso de acustica en arquitectura**. Madrid: Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid, 1982. 215 p.

SMITH, B. J.; PETERS, R. J.; OWEN, S., ***Acoustics and noise control***. Londres: Longman, 1982.

TOUTONGE, José de Aviz. **Projeto e Construção de Câmaras Reverberantes em Escala Reduzida para o Estudo das Características de Perda de Transmissão de Divisórias confeccionadas a Partir de Materiais Regionais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará. Área de concentração em Vibrações e Acústica, Pará, 2006.

ÚRIA, M. G. T. **Avaliação Acústica de salas de aula em escolas públicas na cidade de Belém-Pará: uma proposição de projeto acústico**". 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Pará, , 2005.

VORLÄNDER, M. Simulation of the Transient and Steady-State Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-Tracing/Image-Source Algorithm. **J. Acoust. Soc. Am.** n. 86, p.172-178, 1989.

VÖRLANDER, M. **Auralization**. Berlin: Springer, 2008.

WATTS, G.R.; NELSON P.M. The Relationship Between Vehicle Noise Measures and Perceived Noisiness. **Journal of Sound and Vibration**, England, v. 164, n. 3, p. 425-444, 1993.

YAMAGUCHI, S.; SAEKI, T.; KATO, Y. **A Fundamental Consideration on Estimating  $L_{eq}$  of Specific Noise Under the Existence Background Noise**. Japan: Applied Acoustic, v. 55, n. 3, p. 165-180, 1998.

ZANNIN, P.H.T.; CALIXTO, A.; DINIZ, F.B. **Environmental Noise Pollution in Residential Areas of the City of Curitiba**. Curitiba: Acta Acustica, v. 87, p. 625-628, 2001.

ZANNIN P.H.T. et al. **Incômodo Causado pelo Ruído Urbano à População de Curitiba, PR**. Revista de Saúde Pública, São Paulo, v.36, n. 4, p. 521-524, 2002.

## **APÊNDICE I**

As informações contidas no Apêndice I encontram-se disponíveis em mídia no formato DVD devido ao seu grande volume e é parte integrante deste trabalho.