
Impacto de Ruído de Tráfego em Edificações Escolares: Metodologia de Avaliação para Diretrizes de Planejamento Urbano

ALEXANDRE GOBBO FERNANDES

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Construção Civil – Conforto Ambiental

Orientadora: Elvira Barros Viveiros

Florianópolis

2002

FERNANDES, Alexandre Gobbo. *Impacto de ruído de tráfego em edificações escolares: metodologia de avaliação para diretrizes de planejamento urbano.*

Florianópolis, 2002. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Santa Catarina

Orientadora: Elvira Barros Viveiros

Defesa: 01/07/2002

Esta dissertação de mestrado apresenta a investigação de uma metodologia para avaliação do impacto de ruído, aplicada à situação do projeto para ampliação da via próxima ao novo edifício projetado para o Curso de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Com os resultados foi possível basear diretrizes para a elaboração de uma regulamentação para planejamento urbano visando o controle do impacto do ruído gerado por vias de tráfego em edificações escolares.

Palavras-chave: inteligibilidade da fala, ruído de tráfego, simulação computadorizada, planejamento urbano

**Dissertação defendida em 01 / 07 / 2002,
aprovada pela comissão examinadora:**

Prof. Dr. Elvira Barros Viveiros – Orientadora / Mediadora

Prof. D. Sc. Roberto A. Tenenbaum – Examinador

Prof. PhD. Lino Fernando B. Peres – Examinador

Prof. PhD. Arcanjo Lenzi – Examinador

Prof. Dr. Jucilei Cordini – Coordenador do CPGEC

**A Deus,
aos meus pais e meus irmãos,
aos meus amigos,
às pessoas que amo.
Todos aqueles que estiveram presentes
em cada momento,
com a dose certa de apoio,
carinho
e amor.**

Agradeço,

Agradeço imensamente a todos do Labcon, Laboratório de Conforto Ambiental: Adriano, Amílcar, Prof. Anderson Claro, Catarina, Diego, Érika, Marcel, Otávio, Roberta, Rodrigo, Solange e Veridiana. Pela paciência, pelo apoio, pelas discussões maravilhosas, pelas comemorações e pelo carinho. Principalmente ao Fernando O. R. Pereira por me receber abertamente em sua equipe e colocar toda a estrutura do laboratório à disposição da pesquisa e do ensino.

Agradeço a toda comunidade do ARQ, Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Prof. Lino Peres, demais professores, alunos e cia., com quem eu convivi e aprendi nas inúmeras horas que passei “dissertando”. Em especial para a turma do Labproj: Prof. Américo, Ricardo, Ulisses, Itu e todos os chegados, companheiros de madrugadas.

Agradeço ao LVA, Laboratório de Vibrações e Acústica, suporte técnico e “moral” para os pesquisadores brasileiros em acústica, inclusive por disponibilizar o software para simulações e os aparelhos para medição. Muito especialmente ao Prof. Arcanjo Lenzi e Prof. Samir N. Y. Gerges pelas conversas edificantes, apoio e paciência na solução dos percalços do caminho.

Agradeço a GROM - Acústica e Automação, pelo apoio técnico e suporte dado tanto nos aparelhos de medição quanto no software de simulação e expresso minha admiração pela demonstração de compromisso com a pesquisa. Agradeço ao IPUF e a Prefeitura do Campus da UFSC pelas informações técnicas e pelas plantas e figuras fornecidas.

Agradeço à UFSC e a ECV e toda a estrutura capaz de manter tamanha força e volume de pesquisas, docentes e alunos de excelência. Agradeço também aos colegas do LabEEE, e todos os outros laboratórios parceiros de “conforto”.

Agradeço à orientadora Elvira B. Viveiros por todos os momentos de elucidações e orientações durante a sinuosa - e senoidal - estrada. E também aos colegas de dissertação acústica: Flávia e Marco, pelo companheirismo e suporte mútuo em todas as “fases” do trabalho.

Agradeço aos amigos da república, Dion e Uwe, por serem os grandes amigos e a família querida nestes tempos, pois sem eles não sairia nem a primeira linha. Aos amigos “das antigas” e respectivas famílias: Diogo, Mateus, Pedro e Fábio, principalmente a este, pela acolhida carinhosa nos primeiros meses de Floripa. Ao velho amigo Lucas pela conversas que fizeram ‘a diferença’. Pelos colegas de graduação e profissão Alberto e Daniel, pelos momentos maravilhosos de ‘reflexão profissional’. Aos amigos de boemia, que não são poucos, principalmente ao kabessudo Leandro pelo companheirismo na finaleira do trabalho.

Agradeço a Deus por abençoar meu caminho. Agradeço a meu pai Celso, minha mãe Cidinha, meu irmão Diego, minha irmã Luciana, cunhadão Sergio e o pequeno Gabriel, meu afilhado amado, suportes fundamentais e vozes presentes em meu coração, a cada passo da minha vida. Agradeço a toda a minha família avôs e avós, tios e primos, que souberam expressar mensagens de apoio a cada encontro. Agradeço a minha companheira Ana, pelo amor, carinho e dedicação que somente ela poderia me dar.

Agradeço a todas as demais pessoas envolvidas neste trabalho, direta ou indiretamente que, até inconscientemente, contribuíram para o sucesso deste e permanecem, assim, na memória de cada página desta dissertação.

ÍNDICE

<u>1</u>	<u>CAPÍTULO - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>1.1</u>	<u>Estrutura da dissertação</u>	2
<u>1.2</u>	<u>Objetivo</u>	3
<u>1.2.1</u>	<u>Objetivos específicos</u>	3
<u>1.3</u>	<u>Justificativa</u>	4
<u>2</u>	<u>CAPÍTULO - O TRÁFEGO URBANO COMO FONTE SONORA</u>	6
<u>2.1</u>	<u>A fonte de ruído de tráfego</u>	6
<u>2.1.1</u>	<u>Percepção humana do ruído</u>	7
<u>2.2</u>	<u>A fonte de ruído: via de tráfego de veículos</u>	8
<u>2.2.1</u>	<u>Fatores que influenciam na emissão sonora de uma via de tráfego</u>	8
<u>2.2.2</u>	<u>Fatores que influenciam na propagação do ruído</u>	12
<u>2.3</u>	<u>Indicadores para a avaliação de ruído de tráfego</u>	15
<u>2.3.1</u>	<u>Medidas reguladoras</u>	18
<u>2.4</u>	<u>Conclusões</u>	18
<u>3</u>	<u>CAPÍTULO - QUALIFICAÇÃO ACÚSTICA EM SALAS DE AULA</u>	20
<u>3.1</u>	<u>Comportamento da audição humana e percepção da fala</u>	20
<u>3.2</u>	<u>Testes de inteligibilidade</u>	22
<u>3.3</u>	<u>Indicadores do grau de interferência de um ruído na fala</u>	23
<u>3.4</u>	<u>Reverberação acústica de uma sala</u>	25
<u>3.5</u>	<u>Indicadores da reverberação acústica em salas de aula</u>	26
<u>3.6</u>	<u>Indicadores de inteligibilidade da fala em salas</u>	28
<u>3.7</u>	<u>Recomendações de TR e níveis de ruído ambiente em salas de aula</u>	30
<u>3.7.1</u>	<u>Regulamentações e diretrizes para qualidade acústica em salas de aula</u>	31
<u>3.8</u>	<u>Urbanização e qualidade de ensino</u>	33
<u>3.8.1</u>	<u>Via de tráfego versus inteligibilidade</u>	35

<u>3.9</u>	<u>Conclusões</u>	36
<u>4</u>	<u>CAPÍTULO - ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO</u>	37
<u>4.1</u>	<u>A situação atual da área de estudo</u>	37
<u>4.2</u>	<u>Medições de ruído ambiental</u>	40
<u>4.3</u>	<u>Estimativa dos erros em medições de ruído de tráfego</u>	40
<u>4.3.1</u>	<u>Análise estatística do nível sonoro de vias de tráfego</u>	41
<u>4.3.2</u>	<u>Classe de erro de instrumentos de medição</u>	42
<u>4.3.3</u>	<u>Erros gerados pela ação dos efeitos meteorológicos</u>	44
<u>4.4</u>	<u>Estimativa de correções dos valores medidos</u>	45
<u>4.5</u>	<u>Medições dos indicadores de ruído</u>	49
<u>4.5.1</u>	<u>Estimativa dos valores L10 e L90</u>	53
<u>4.6</u>	<u>Avaliação dos resultados obtidos para estimativa de erros e correções</u>	56
<u>4.6.1</u>	<u>Comportamento do ruído nos diferentes pontos de medição</u>	61
<u>4.6.2</u>	<u>Comportamento do ruído nos diferentes dias de medição</u>	62
<u>4.7</u>	<u>Análise preliminar dos níveis de ruído gerados pela via</u>	63
<u>4.8</u>	<u>Conclusões</u>	64
<u>5</u>	<u>CAPÍTULO - PREVISÃO DE IMPACTO DE RUÍDO AMBIENTAL</u>	66
<u>5.1</u>	<u>Programa computacional SoundPLAN®</u>	66
<u>5.2</u>	<u>Parâmetros considerados pelo programa computacional</u>	69
<u>5.3</u>	<u>Métodos de cálculo</u>	71
<u>5.3.1</u>	<u>Previsão de ruído de tráfego segundo a norma RLS90</u>	72
<u>5.4</u>	<u>Comportamento do método de cálculo RLS90 em simulações computacionais</u>	74
<u>5.5</u>	<u>Precisão do modelo computacional para previsão de ruído</u>	75
<u>5.6</u>	<u>Considerações finais</u>	76

<u>6</u>	<u>CAPÍTULO - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE RUÍDO DE TRÁFEGO</u>	78	
<u>6.1</u>	<u>Parâmetros de ajuste de precisão dos cálculos</u>	78	
<u>6.2</u>	<u>Validação dos modelos de simulação</u>	79	
<u>6.3</u>	<u>Criação do modelo geométrico digital para a área de estudo</u>	82	
<u>6.4</u>	<u>Ajuste final do modelo</u>	83	
<u>6.5</u>	<u>Avaliação da precisão do modelo de simulação x medições</u>	85	
<u>6.5.1</u>	<u>Procedimentos da medição próxima à edificação</u>	86	
<u>6.6</u>	<u>Comparação dos valores medidos com os valores simulados</u>	87	
<u>6.6.1</u>	<u>Distribuições Bidimensionais</u>	88	
<u>6.6.2</u>	<u>Correções aplicadas e erros estimados</u>	89	
<u>6.6.3</u>	<u>Resultado da correlação dos níveis de ruído medidos x níveis de ruído simulados</u>	89	
<u>6.6.4</u>	<u>Análise dos valores absolutos e determinação de correções</u>	91	
<u>6.7</u>	<u>Conclusões</u>	91	
<u>7</u>	<u>CAPÍTULO - AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE RUÍDO DE TRÁFEGO</u>	93	
<u>UFSC</u>	<u>7.1</u>	<u>O novo edifício para o Departamento de Arquitetura e Urbanismo da</u>	93
	<u>7.2</u>	<u>Características de tráfego da via em estudo atual</u>	95
	<u>7.3</u>	<u>Simulação do novo edifício com a via de tráfego atual</u>	96
	<u>7.4</u>	<u>Características de tráfego da via em estudo futura</u>	98
	<u>7.5</u>	<u>Simulação do novo edifício com a via de tráfego futura</u>	103
	<u>7.6</u>	<u>O impacto de ruído de tráfego na edificação escolar</u>	104
	<u>7.6.1</u>	<u>Aplicação dos resultados em valores absolutos da simulação</u>	105
<u>8</u>	<u>CAPÍTULO - REGULAMENTAÇÃO PARA PLANEJAMENTO DO RUÍDO URBANO</u>	107	

<u>8.1</u>	<u>Regulamentações para planejamento e projeto de edificações escolares</u>	108
<u>8.2</u>	<u>Regulamentações para conforto acústico no ambiente urbano</u>	109
<u>8.3</u>	<u>Proposta para regulamentação do ruído de vias de tráfego em áreas com atividades escolares</u>	111
<u>8.4</u>	<u>Considerações finais para uma regulamentação nacional</u>	113
<u>9</u>	<u>CAPÍTULO - CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	115
<u>9.1</u>	<u>Recomendações para trabalhos futuros</u>	117

LISTA DE FIGURAS

<u>Figura 1 - Localização geográfica de Florianópolis</u>	1
<u>Figura 2 - Comparação do espectro do comportamento do ruído de tráfego para vias em áreas centrais urbanas e em estradas de alta velocidade (IRVINE e RICHARDS, 1983)</u>	9
<u>Figura 3 - Comparação entre o espectro típico para veículos pesados e veículos leves (IRVINE e RICHARDS, 1983)</u>	10
<u>Figura 4 - Nível médio de ruído gerado por uma via de tráfego em função do fluxo de tráfego para diferentes porcentagens de veículos pesados (STEPHENSON e VULKAN, 1968)</u>	12
<u>Figura 5 - Atenuação do ruído de tráfego pela distância para diferentes valores L% (HASSAL e ZAVERI, 1968)</u>	17
<u>Figura 6 - Comparação entre típicos espectros de frequência do ruído de tráfego e da voz (BUILDING BULLETIN, 1975)</u>	22
<u>Figura 7 - Valores de inteligibilidade da fala em função de S/R para diferentes valores de TR (BRADLEY, 1986b)</u>	30
<u>Figura 8 - Localização da área de estudo dentro do campus universitário</u>	38
<u>Figura 9 - Foto aérea da situação atual na área de estudo, via principal acima, via secundária à esquerda e edifício escolar ao centro e abaixo (IPUF, 2001)</u>	39
<u>Figura 10 - Diferença esperada para os níveis de ruído, em função do tempo total de amostragem, para diferentes indicadores (FINKE, 1992)</u>	46
<u>Figura 11 - Diferença esperada para os níveis de ruído em função do intervalo de amostragem para diferentes indicadores (FINKE, 1992)</u>	46
<u>Figura 12 - Modelo do relatório de medição desenvolvido para o estudo</u>	51
<u>Figura 13 - Planta digitalizada da área com os pontos de medição indicados de 1 a 5</u>	53
<u>Figura 14 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 1</u>	54
<u>Figura 15 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 2</u>	54
<u>Figura 16 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 3</u>	55
<u>Figura 17 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 4</u>	55

<u>Figura 18 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 5.</u>	56
<u>Figura 19 - Ponto 1: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.</u>	56
<u>Figura 20 - Ponto 2: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.</u>	57
<u>Figura 21 - Ponto 3: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.</u>	57
<u>Figura 22 - Ponto 4: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.</u>	58
<u>Figura 23 - Ponto 5: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.</u>	58
<u>Figura 24 - Variação dos valores $Leq(A)$ obtidos nas medições ao longo da via.</u>	59
<u>Figura 25 - Variação dos valores $L10(A)$ obtidos nas medições ao longo da via.</u>	59
<u>Figura 26 - Variação dos valores $L90(A)$ obtidos nas medições ao longo da via.</u>	60
<u>Figura 27 - Variação dos valores $L_{m\acute{a}x}(A)$ obtidos nas medições ao longo da via.</u>	60
<u>Figura 28 - Comparação das médias entre os diferentes dias de medição, para cada indicador de ruído em cada um dos pontos de medição.</u>	61
<u>Figura 29 - Comparação das médias entre os diferentes pontos de medição, para cada indicador de ruído, em cada um dos dias de medição.</u>	62
<u>Figura 30 - Valores medidos para os dias e pontos de medição, para cada indicador de ruído.</u>	63
<u>Figura 31 - Pontos receptores definidos pela malha de receptores.</u>	67
<u>Figura 32 - A altura dos pontos é definida pela topografia digitalizada.</u>	67
<u>Figura 33 - Interpolação dos pontos receptores de uma malha de receptores.</u>	68
<u>Figura 34 - Princípio de funcionamento do ângulo de varredura.</u>	68
<u>Figura 35 - Tratamento de fontes lineares.</u>	69
<u>Figura 36 - Resultado dos testes da propagação do ruído de uma via em um terreno plano.</u>	80
<u>Figura 37 - Resultado do teste da propagação de ruído de uma via em um terreno plano e um edifício.</u>	81

<u>Figura 38 - Resultado do teste da propagação de ruído de uma via em um terreno plano e um grupo de quatro edifícios.....</u>	82
<u>Figura 39 - Planta digitalizada de situação da área de estudo.....</u>	83
<u>Figura 40 - Resultado do teste com modelo simplificado da área de estudo, sem a inserção do edifício atual.....</u>	84
<u>Figura 41 - Resultado teste com modelo simplificado da área de estudo com o edifício atual.</u>	85
<u>Figura 42 - Planta digitalizada da área com os pontos de medição indicados por A, B e C.....</u>	87
<u>Figura 43 - Diagrama de dispersão Leq simulados x Leq medidos.....</u>	90
<u>Figura 44 - Planta de situação da área de estudo com a nova edificação.</u>	94
<u>Figura 45 - Cortes gráficos do projeto de arquitetura para o novo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC (MENDES et al., 2001).....</u>	95
<u>Figura 46 - Resultado da simulação das curvas de nível de ruído na área de estudo com o novo edifício: emissão de ruído da via de tráfego atual.....</u>	97
<u>Figura 47 - Mapa da região central da ilha indicando as principais vias de tráfego.....</u>	99
<u>Figura 48 - Projeto do anel viário de ligação Beira-mar Norte – Sul.</u>	100
<u>Figura 49 – Mapa da Ilha de santa Catarina indicando as principais vias de acesso rodoviário.</u>	101
<u>Figura 50 - Situação urbana futura da área em estudo, novo edifício e nova via duplicada..</u>	102
<u>Figura 51 - Resultado da simulação das curvas de nível de ruído na área de estudo com o novo edifício: emissão de ruído da via de tráfego futura.....</u>	130

LISTA DE TABELAS

<u>Tabela 1 - Equivalência de energia sonora gerada em função da categoria de veículo (STEPHENSON e VULKAN, 1968).</u>	11
<u>Tabela 2 - Limites de emissão de ruído de tráfego (BRÜEL & KJAER, 2001).</u>	18
<u>Tabela 3 - Comparação de diferentes exigências acústicas para salas de aula (BROOKS et al., 1998; MACKENZIE, 1998; Vallet, 2000; ABNT, 1999; BERGLUND e LINDVALL, 1995; ASHA, 1995).</u>	32
<u>Tabela 4 - Resultados de um estudo sobre as condições do ruído de tráfego de vias próximas a três escolas de segundo grau em Istambul (KURRA, 2000).</u>	35
<u>Tabela 5 - Tabela para estimativa do intervalo de confiança, d, para a média dos dados de um grupo de poucas amostras, em função do número de amostras, n, e do desvio padrão, s (FINKE, 1992).</u>	42
<u>Tabela 6 - Classe de precisão de medidores de NPS e respectivas margens de erro (IEC 60651 e IEC 60804 apud FINKE, 1992).</u>	43
<u>Tabela 7 - Correspondência do coeficientes de absorção e as perdas por reflexão (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000).</u>	70
<u>Tabela 8 - Normas para ruído de tráfego utilizadas no SoundPLAN® (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000).</u>	72
<u>Tabela 9 - Fluxo horário e a composição de tráfego calculados, correspondente a cada medição.</u>	88
<u>Tabela 10 - Comparação entre os valores $Leq(A)$ medidos, corrigidos em +1,3 dB(A), e os valores simulados para cada uma das posições de medição.</u>	90
<u>Tabela 11 - Resultado dos níveis de ruído Leq simulados para estudo do impacto na área.</u>	104
<u>Tabela 12 - Regulamentação alemã para performance do isolamento acústico de fachadas em escolas dependendo do ruído externo medido (VALLET, 2000).</u>	112
<u>Tabela 13 - Classificação das vias para planejamento urbano (FLORIANÓPOLIS, 1998).</u>	113

RESUMO

Para que o projeto arquitetônico de edificações escolares ofereça qualidade acústica adequada as atividades de ensino, é necessário, dentre outros aspectos, o conhecimento do ruído gerado pelas vias de tráfego urbano e seus efeitos sobre a aprendizagem. Na relação das escolas com o entorno urbano, e no próprio planejamento das cidades, essas investigações devem basear regulamentações das ações modificadoras do espaço urbano. Como contribuição nesse sentido, esse trabalho avalia o impacto do ruído de tráfego causado pelo projeto de ampliação da via de contorno do campus universitário em Florianópolis, Santa Catarina, sobre o projeto arquitetônico da futura edificação sede do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Uma metodologia de avaliação do impacto do ruído de tráfego é proposta e analisada.

Através de medições *in situ*, indicadores foram selecionados para fornecerem os dados para caracterização do ruído gerado pela via de tráfego atual. Um modelo digital da situação presente foi criado e simulações foram realizadas gerando as curvas de nível de ruído ambiental. A validação do modelo virtual foi feita pela análise estatística dos dados colhidos em campo em comparação aos dados gerados pelo programa de simulação. Em seguida, com o projeto arquitetônico do novo edifício, foram simuladas a situação de tráfego com a via atual e com o novo traçado da via, estimando-se os futuros níveis de ruído para a área e quantificando-se, então, o impacto da implantação da nova via.

O resultado da análise dessas investigações permitiu apresentar orientações e estabelecer diretrizes para criação de uma regulamentação para o planejamento urbano em áreas com edificação para atividades de ensino e aprendizagem, considerando-se o conflito entre o ruído das vias de tráfego urbano e a necessária qualidade acústica em salas de aula.

ABSTRACT

In order to guarantee acoustical quality in education buildings that are within urban areas it is necessary the knowledge of the road traffic noise emission and its effects on people involved in educational activities. The relationship between the school building and its surroundings, as well as the urban design itself, needs to be identified by means of investigations, which will base regulations for planning the cities. This research evaluates the road noise impact caused by a new ring road design around the university precinct upon the new building of the Department of Architecture and Urbanism of the Federal University of Santa Catarina, Brazil.

By means of *in-situ* measurements, indicators were chosen to produce data that characterise the noise generated by the existing road. A model of the present situation was created and ambient noise levels curves were the output data of digital simulations. The validation of the virtual model was done by means of the comparison between measured and simulated data. Subsequently, new simulations were performed, this time considering the new building design and both surrounding situations – the present and the proposed road design. The expected ambient noise levels for the area were quantified and the impact of new urban design established.

The result of these investigations gave rise to guidelines, which could base regulations for urban planning of areas with educational activities, taking into account the conflict between the road traffic noise and the acoustical needs for classrooms and all learning activities.

1 CAPÍTULO - INTRODUÇÃO

Uma reportagem recente destacando o crescimento de Florianópolis apresentou dados importantes para a análise da condição urbana atual da cidade (VILLELA e BAPTISTA, 2001). Florianópolis tem 97% de seu território na Ilha de Santa Catarina, localizada na costa do Estado de Santa Catarina, como mostra a Figura 1. É uma capital formada por diversas áreas de concentração populacional, entremeada por grandes porções de áreas inabitadas, distribuídas por toda a ilha. É a única capital brasileira que não é também o centro industrial e econômico de seu estado e, também a cidade mais populosa, com 330.000 habitantes.



Figura 1 - Localização geográfica de Florianópolis.

No entanto, Florianópolis se tornou o município brasileiro que mais cresceu em produto interno bruto per capita nas últimas três décadas, a uma velocidade de 6% ao ano. Seu crescimento deve-se a um fenômeno migratório único na história recente brasileira, o de gente em busca de qualidade de vida, não de prosperidade financeira. Se o Brasil tivesse tido o mesmo desempenho no período, seria hoje um dos países mais ricos do mundo. Dois terços da população pertencem às classes A, B e C. Cerca de 29.000 brasileiros, em sua maioria de classe média, se mudaram para a capital catarinense entre 1991 e 1996, quase 10% da população total (IBGE apud VILLELA e BAPTISTA, 2001). Como exemplo, a Universidade Federal de Santa Catarina tem 1.828 professores onde 1.590 não são ilhéus, nativos da cidade.

O transporte público possui uma extensa rede de ônibus e microônibus. Ainda assim, a cidade possui a segunda maior concentração de automóveis por habitante do país. Com o crescimento da cidade, estão sendo executadas ampliações em sua malha viária. Essas ampliações são projetos para o aumento da capacidade de fluxo das vias de tráfego e criação de novas vias. Uma das conseqüências mais diretas dessas ações é o aumento do nível de

ruído ambiente nas áreas de ampliação. Por isso, o planejamento futuro dessas áreas deve considerar o impacto do aumento do nível de ruído de tráfego na qualidade de vida das áreas habitadas, especialmente para áreas com edificações destinadas às atividades de ensino, para que o grande mérito de ser apontada como “a cidade com melhor qualidade de vida do Brasil”, não se transforme no principal problema para as gerações futuras.

Nos próximos itens deste Capítulo serão apresentados a estrutura do trabalho, os objetivos e a justificativa para o tema desenvolvido.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Essa dissertação segue a seguinte ordem de capítulos, contendo:

Capítulo 1 – Introdução ao trabalho desenvolvido, apresentação dos objetivos do trabalho e da justificativa para o tema escolhido.

Capítulo 2 - Levantamento e análise do estado da arte sobre ruído de tráfego em vias urbanas, dos métodos de avaliação e de regulamentações nacionais e internacionais.

Capítulo 3 - Levantamento e análise do estado da arte sobre qualidade acústica em salas de aula e dos métodos de avaliação e de regulamentações nacionais e internacionais.

Capítulo 4 – Resultado das medições de ruído no local de estudo e análise estatística dos indicadores para avaliação de ruído de tráfego aplicados à análise da via de tráfego atual.

Capítulo 5 - Levantamento e análise do funcionamento das ferramentas para previsão de impacto de ruído de tráfego em áreas urbanas através de métodos de cálculo e simulação computadorizada.

Capítulo 6 – Apresentação do modelo geométrico digital da área de estudo e resultado das simulações para análise das características do ruído ambiente no local. Explicita, também, o método de validação do modelo virtual gerado pela análise da correlação estatística entre os dados colhidos em campo e os dados gerados pelo programa de simulação.

Capítulo 7 - Análise do novo plano para a avenida do local de estudo, assim como o projeto arquitetônico do novo edifício do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina. Apresentação de um modelo digital para simulação

da situação futura e previsão do nível de ruído na área em estudo. Avaliação do impacto do ruído tráfego, gerado pelo projeto da via existente, sobre a edificação escolar.

Capítulo 8 - Levantamento e análise de regulamentações e legislações existentes para planejamento urbano e construção de edificações, com enfoque para questões do ruído de vias de tráfego em cidades. Apresentação de diretrizes para criação de uma regulamentação para planejamento do conflito urbano entre o ruído gerado por vias de tráfego e as necessidades acústicas especiais de áreas com edificações destinadas às atividades de ensino e aprendizagem.

Capítulo 9 - Apresentação das considerações finais do trabalho e de sugestões para trabalhos futuros.

1.2 OBJETIVO

Essa dissertação de mestrado pretende apresentar diretrizes que possam basear a elaboração de uma regulamentação para planejamento e controle do impacto do ruído gerado por vias de tráfego urbano em áreas destinadas à instalação de edificações escolares.

1.2.1 Objetivos específicos

- Levantamento e análise do estado da arte sobre ruído de tráfego em vias urbanas, métodos de avaliação e regulamentações nacionais e internacionais.
- Levantamento e análise do estado da arte sobre qualidade acústica em salas de aula e métodos de avaliação e regulamentações nacionais e internacionais.
- Levantamento e análise do funcionamento das ferramentas para previsão do impacto do ruído de tráfego em áreas urbanas, através de métodos de cálculo e simulação computadorizada.
- Desenvolvimento de um estudo de caso real de análise do impacto de ruído de tráfego em uma área destinada às edificações escolares.

- Levantamento e análise de regulamentações e legislações existentes para planejamento urbano e construção de edificações, com enfoque para questões de controle do ruído de vias de tráfego.

1.3 JUSTIFICATIVA

O papel do ensino é reconhecidamente fundamental para o desenvolvimento de um país, de sua economia, política, cultura, pesquisa e tecnologia. Nesse processo é primordial a transmissão do conhecimento através das gerações, de professor para aluno. A escola, o espaço do saber e do aprender, é o local onde deve haver condições perfeitamente adequadas para esse processo de transmissão de conhecimento. Para tanto, é preciso uma estrutura física e didática – livros, apostilas, salas, laboratórios e professores – bem como prover a qualidade necessária aos espaços de aprendizado, através de conforto ambiental para as atividades desenvolvidas.

A falta de planejamento das cidades gera muitos problemas à qualidade de vida e conforto da população. Iluminação, ventilação, conforto térmico e acústico são condicionantes diretamente influenciadas pelas intervenções urbanas. Sem um planejamento urbano adequado os problemas gerados são amplificados, implicando intervenções mais complexas e, conseqüentemente, mais onerosas. Da mesma forma, planejamentos urbanos mal executados geram altos níveis de ruído ambiente nas grandes cidades (GUEIROS e ROSA, 2001). A geração de áreas urbanas “doentes” induz a proliferação de edificações herméticas que criam ambientes internos inadequados para atividades humanas. Com isso há um grande custo no emprego de técnicas para correção e/ou proteção contra o ruído, além de gasto energético decorrente, por exemplo, na instalação de sistemas de climatização e iluminação.

Uma das conseqüências do crescimento das cidades é a necessidade de ampliação da capacidade de tráfego de suas vias de circulação, pelo aumento da frota de veículos particulares, de coletivos para transporte público e, também, de bens transportados por caminhões para dentro e fora da cidade. Dessa ampliação, quase sempre sem estudos aprofundados, freqüentemente são gerados níveis de ruído muito acima dos adequados para as regiões cortadas pelas vias. A falta de estudos do impacto decorrente, quase sempre cria a desqualificação dessas áreas como, por exemplo, as destinadas à educação.

O fator de maior importância para a qualidade de ensino é a compreensão da palavra falada, ou seja, a inteligibilidade da fala, associada ao poder de concentração dos alunos. É notório o fato de que a concentração é estreitamente ligada ao nível de ruído ambiente. Em edificações escolares, baixos níveis de ruído ambiente são de grande relevância para a inteligibilidade da fala dentro das salas de aula e para a concentração mental em espaços dedicados à leitura. Reconhecendo a importância dos locais onde ocorrem atividades de ensino e, considerando suas necessidades acústicas especiais, pode-se identificar a urgência de medidas que protejam essa área de outras geradoras de ruído. A maneira mais eficaz de minimizar esses conflitos é com o planejamento urbano, na implantação da edificação associada ao zoneamento das áreas de uso da cidade.

A cidade de Florianópolis apresenta um planejamento de expansão urbana bastante usual para as cidades brasileiras, onde a busca pela adequação da capacidade das vias tráfego de veículos acontece em detrimento da qualidade de vida dos habitantes e usuários das áreas marginais às vias. Recentemente, o município de Florianópolis vem dando maior importância para o planejamento e adequação de atividades geradoras de ruído, através de legislações que regulam a compatibilidade entre zonas e usos (FLORIANÓPOLIS, 1999). Essa iniciativa, porém, não considera a via de tráfego como uma fonte geradora de ruído e ignora o impacto sonoro gerado pela expansão da malha viária. Em conjunto, há um movimento na direção da implantação de critérios de desempenho acústico de edificações para o código de obras do município.

Para cada tipo de atividade de cada zona da cidade, níveis máximos de ruído ambiente devem ser estabelecidos. Dependendo das condições acústicas externas, mudam as exigências de performance da edificação. Para um planejamento urbano adequado é necessário que regulamentações existam para a avaliação do impacto ambiental dos níveis de ruído dos novos projetos. Com um planejamento urbano que leve em consideração aspectos acústicos das diferentes áreas da cidade, mais especificamente da relação entre as áreas escolares e as vias de tráfego, é possível criar meios para que os níveis externos de ruído estejam adequados às necessidades da edificação escolar. Esse raciocínio, estendido para todas as outras áreas urbanas, poderia prover a cidade de ambientes muito mais adequados e confortáveis para a vida humana.

2 CAPÍTULO - O TRÁFEGO URBANO COMO FONTE SONORA

O som é gerado pela vibração de um corpo, que produz uma oscilação da pressão alternando compressões e rarefações, em um meio elástico. Essa onda acústica gerada, quando causa uma sensação auditiva indesejada, é chamada de ruído. O ruído ambiente é a composição dos sons indesejados de várias fontes próximas e afastadas, em um certo ponto receptor. O ruído específico é uma componente do ruído ambiente que pode ser identificada e associada a uma fonte específica (BRÜEL & KJAER, 2001). Atualmente, o ruído de tráfego de veículos automotores é a fonte específica que mais contribui para o ruído ambiente urbano. Vias com grande fluxo de veículos estão presentes em áreas urbanas densamente povoadas. Neste Capítulo, são apresentados conceitos relacionados ao ruído gerado por vias de tráfego em áreas urbanas e os indicadores mais utilizados para quantificação do nível de ruído gerado por essa fonte.

2.1 A FONTE DE RUÍDO DE TRÁFEGO

A energia sonora radiada por uma fonte é denominada potência acústica, cuja unidade é Watts [W]. A intensidade sonora I [W/m^2] é a média temporal da razão do fluxo de energia acústica através de uma área normal a direção de propagação da onda. A intensidade sonora é proporcional ao quadrado do valor da variação da pressão sonora P no ar em campo livre, em N/m^2 . Através da medição da amplitude da oscilação da pressão sonora em relação à pressão atmosférica, é possível quantificar a energia sonora em um dado ponto. Pela grande amplitude de sensibilidade e pelo próprio comportamento do ouvido humano, as grandezas acústicas são expressas através da aplicação da escala logarítmica na base dez. O nível de pressão sonora (NPS), em decibel (dB), é então utilizado na prática.

Se as dimensões de uma fonte são pequenas, comparadas à distância que a separa do ponto receptor, então, essa pode ser considerada uma fonte pontual. A potência sonora de uma fonte pontual é definida pela energia sonora distribuída pela superfície de uma esfera com área igual a um metro quadrado. Uma fonte pontual sobre uma superfície tem radiação semi-esférica e sua intensidade I a uma certa distância, r , em metros, é definida por:

$$I = \frac{W}{2\mathbf{p} r^2} \quad (1)$$

À medida que a distância do seu raio aumenta, a área da superfície semi-esférica também aumenta e a mesma energia fica então distribuída por uma área maior. O NPS a uma dada distância em campo livre, pode então ser descrito por:

$$NPS = NWS - 20 \log r - 8 \quad (2)$$

onde o NWS é o nível de potência sonora da fonte. De acordo com a equação (2), a atenuação da energia sonora será de 6 dB para o dobro da distância r .

Uma fonte é considerada linear, quando possui forma longilínea em relação ao ponto receptor. A fonte linear pode ser composta por uma única fonte, ou pode ser fruto da combinação de várias fontes pontuais operando simultaneamente em linha. O tráfego de veículos em uma via pode ser considerado como uma fonte sonora linear, formada por inúmeras fontes pontuais em movimento, com propagação semi-esférica. As ondas sonoras, a partir de uma fonte linear, irradiam-se na forma de uma série de superfícies cilíndricas concêntricas. Quando a extensão de uma fonte linear é muito maior que sua distância em relação ao ponto receptor, pode-se considerar que a propagação calculada a partir da fonte vai aumentando apenas em duas dimensões. Neste caso, ao NPS produzido pela fonte a uma certa distância, r , pode ser calculada por:

$$NPS = NWSu - 10 \log r - 5 \quad (3)$$

onde o NWSu é a potência sonora de uma unidade de comprimento da fonte linear (IOA, 1996). De acordo com a equação (3) têm-se 3 dB de atenuação para cada duplicação da distância. Porém, com o aumento da distância entre a fonte e o receptor, as características da propagação do ruído emitido por uma via de tráfego vão ficando próximas ao comportamento da fonte pontual com propagação semi-esférica.

2.1.1 Percepção humana do ruído

O número de vezes que a pressão sonora completa um ciclo de oscilação durante um segundo, é denominado frequência, em Hertz (Hz). O espectro de um ruído é determinado pela caracterização do nível de pressão sonora das diferentes frequências que o compõem.

Através da determinação do espectro característico de um ruído e seu comportamento no tempo, é possível definir completamente a emissão sonora de uma fonte. O sistema auditivo humano não é igualmente sensível a todas as frequências. Para aproximar a resposta de frequência do espectro do ruído medido à sensibilidade humana, são aplicadas diferentes curvas de ponderação aos valores em dB, determinando a contribuição relativa de cada componente de frequência, que caracterizam esse ruído. A curva de ponderação (A), é utilizada para descrever a sensibilidade do ouvido humano para os sons com intensidade moderada, amplamente utilizada em estudos de grande parte dos ruídos urbanos, como o ruído de vias de tráfego. A denominação (A) é utilizada para indicar que essa curva de ponderação está sendo aplicada.

2.2 A FONTE DE RUÍDO: VIA DE TRÁFEGO DE VEÍCULOS

A investigação do ruído de tráfego divide-se em três momentos: a emissão sonora pela via, a propagação das ondas acústicas no meio e a recepção pelo ouvido em certo local. A emissão do ruído por uma via depende das características dos veículos que trafegam por esta, das características físicas da via e das características do tráfego em si. A propagação das ondas acústicas até o ponto receptor é influenciada por efeitos meteorológicos, atmosféricos e pelas características urbanas e geográficas na sua trajetória. A recepção desse ruído irá depender das características acústicas do local onde o indivíduo se encontra e de questões subjetivas ligadas à forma como esse ruído atua no indivíduo.

2.2.1 Fatores que influenciam na emissão sonora de uma via de tráfego

O nível de emissão sonora de uma via de tráfego, é produto da combinação do ruído gerado por cada um dos veículos em trânsito e depende das características físicas da via e dos veículos (funcionamento do motor, interação dos pneus com a pavimentação e do gradiente da via) e das características do tráfego (composição, fluxo e velocidade de tráfego).

A via de tráfego é composta de inúmeras fontes, veículos motorizados de diferentes portes e funções, que podem ser divididos em veículos leves (carros de passageiros), veículos pesados (caminhões e ônibus) e motocicletas. Os ruídos gerados pelo motor, sistema de exaustão e transmissão, são dominantes quando o veículo está em baixa velocidade ou parado e contribuem significativamente nas baixas frequências, principalmente para os veículos

pesados. O nível do ruído gerado por essa componente varia, principalmente, em função da velocidade de giro do motor, mais do que a velocidade do veículo em si (TRAFFIC NOISE AND VIBRATION, 1993). A comparação entre o espectro típico de vias de tráfego e seu valor em dB(A), em duas diferentes situações, é mostrado na Figura 2. Vias em áreas urbanas de tráfego intenso, onde a velocidade varia abaixo dos 65 km/h e o ruído predominante é da aceleração e redução do motor, apresentam o NPS nas baixas frequências pronunciadamente maior.

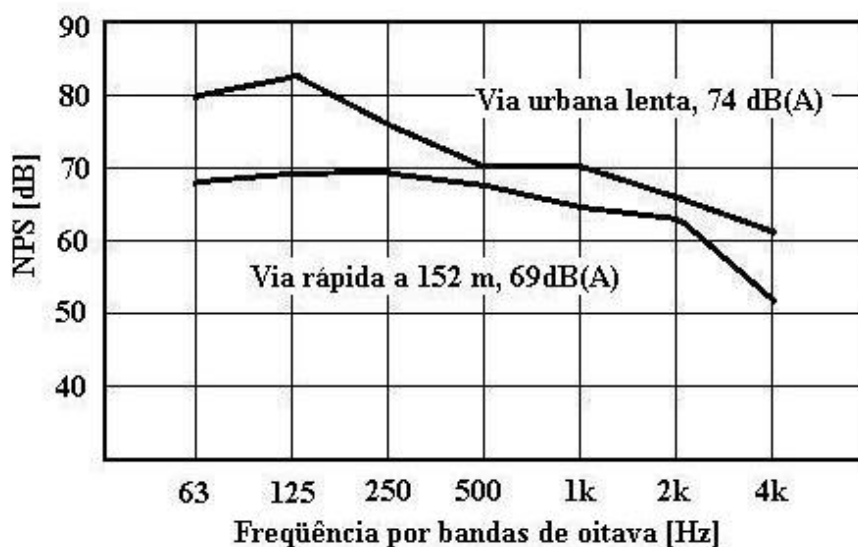


Figura 2 - Comparação do espectro do comportamento do ruído de tráfego para vias em áreas centrais urbanas e em estradas de alta velocidade (IRVINE e RICHARDS, 1983).

Em condições de tráfego livre, particularmente para veículos leves, além do ruído do motor, há um aumento no nível do ruído gerado pela interação dos pneus com a superfície da via, aumentando a contribuição para os níveis nas médias e altas frequências. A proporção dessa contribuição dependerá da velocidade de tráfego, das características dos pneus e da porosidade da pavimentação da via. Em vias com velocidade média acima de 60 km/h, a contribuição desses elementos é bastante significativa. Pavimentações molhadas podem contribuir em até +5 dB ao ruído total, nas frequências acima de 2 kHz (Berglund et al., 1999). Um estudo dos tipos de pneus e pavimentações em uso na Europa, apresentou dados atualizados sobre a influência dessas características (Blokland et al., 1996). Em pavimentações lisas e uniformes, o nível de ruído emitido por pneus de diferentes texturas tem grande variação. Em pavimentações mais acidentadas e ásperas, a variação entre o nível de ruído emitido por diferentes tipos de pneus diminui, porém, o nível médio emitido é bem maior. A contribuição média de diferentes tipos de pavimentação, para os níveis de ruído

emitidos pelos tipos de pneus mais utilizados, aumenta conforme a pavimentação é mais acidentada, podendo chegar a +4,5 dB para superfícies mal acabadas. Pavimentações porosas são capazes de atenuar, em média, -1,0 dB. O nível de ruído emitido por pneus de veículos leves depende, principalmente, da largura do pneu. Pneus mais largos são os que mais contribuem para o ruído de tráfego total. O ruído emitido por pneus de veículos pesados não apresenta variação dependente da largura. Neste caso, a contribuição do ruído emitido pelo pneu para o nível de ruído total é pequena, pois o ruído do motor é normalmente maior para essa categoria de veículos.

A influência do gradiente da via nos níveis de ruído de tráfego depende diretamente da velocidade relativa, da densidade e da composição do tráfego, tanto para aclives quanto para declives. É observado um aumento considerável no ruído emitido por veículos pesados para vias em aclives, muito mais que para veículos leves (JOHNSON e SAUNDERS, 1968).

Veículos de carga e transporte coletivo geram níveis de ruído muito mais altos do que veículos de passageiros, principalmente nas baixas frequências. Medições executadas em diversas vias de tráfego, com composição de até 40% de veículos pesados, mostraram que há uma relação linear entre os níveis de ruído e a porcentagem de veículos pesados, apresentando um aumento médio de +0,5 dB para cada 10% de aumento na proporção de veículos pesados (JOHNSON e SAUNDERS, 1968). Uma composição de 3% de veículos pesados é capaz de gerar mais energia acústica que os restantes 97% dos veículos leves (IRVINE e RICHARDS, 1983). Na Figura 3 pode-se verificar a diferença entre o espectro típico para veículos leves e pesados, na velocidade de 80 km/h, à distância de 15 m da via.

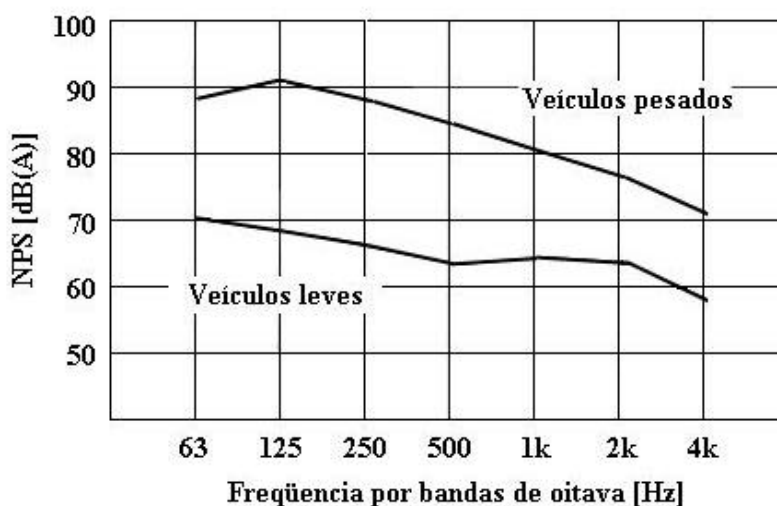


Figura 3 - Comparação entre o espectro típico para veículos pesados e veículos leves (IRVINE e RICHARDS, 1983).

A Tabela 1 apresenta a equivalência dos níveis de emissão de ruído para diferentes tipos de veículos, considerando os valores médios de emissão individual em dB(A), à distância de 7,5m da via, em condições de aceleração normal (STEPHENSON e VULKAN, 1968). Pode-se observar que a contribuição por motocicletas, caminhões pesados e ônibus, para o nível de ruído total da via, é muito maior que por veículos leves.

Tabela 1 - Equivalência de energia sonora gerada em função da categoria de veículo (STEPHENSON e VULKAN, 1968).

Tipo de veículo	Equivalência
carros (leves, médios e pesados)	1
cargas leves	1,5
motocicletas	4
cargas pesadas	10
ônibus	16

O número de veículos por hora que atravessa um trecho de uma via também influencia no nível de ruído emitido por esta. JOHNSON e SAUNDERS (1968) definem o fluxo de veículos por:

$$\text{Fluxo (veículos / hora)} = \text{densidade (veículos/km)} \times \text{velocidade (km/h)} \quad (4)$$

Na prática, enquanto o número de veículos em trânsito não é grande o bastante para influenciar na velocidade de tráfego, o fluxo é diretamente proporcional à densidade de veículos. Essa condição é denominada tráfego livre. Na medida em que o número de veículos aumenta, a interação entre eles faz com que a velocidade diminua, de forma que o valor da razão de crescimento do fluxo pela densidade vai ficando progressivamente menor. A partir do momento em que a capacidade máxima de fluxo da via é alcançada, qualquer aumento na densidade não apenas leva à diminuição da velocidade, mas também gera uma diminuição da razão de fluxo até o ponto de máxima concentração, quando nenhum movimento é mais possível e o tráfego pára. A relação entre o fluxo de tráfego e o nível de ruído gerado por uma via, para diferentes porcentagens de veículos pesados, é mostrado na Figura 4. Em geral, a partir de 1200 veículos por hora, o aumento no nível de ruído passa a ser menor que 3 dB para o dobro do fluxo de tráfego (STEPHENSON e VULKAN, 1968). Com o aumento da

porcentagem de veículos pesados, há praticamente um aumento proporcional nos níveis de ruído, sem mudanças significativas no comportamento geral da curva.

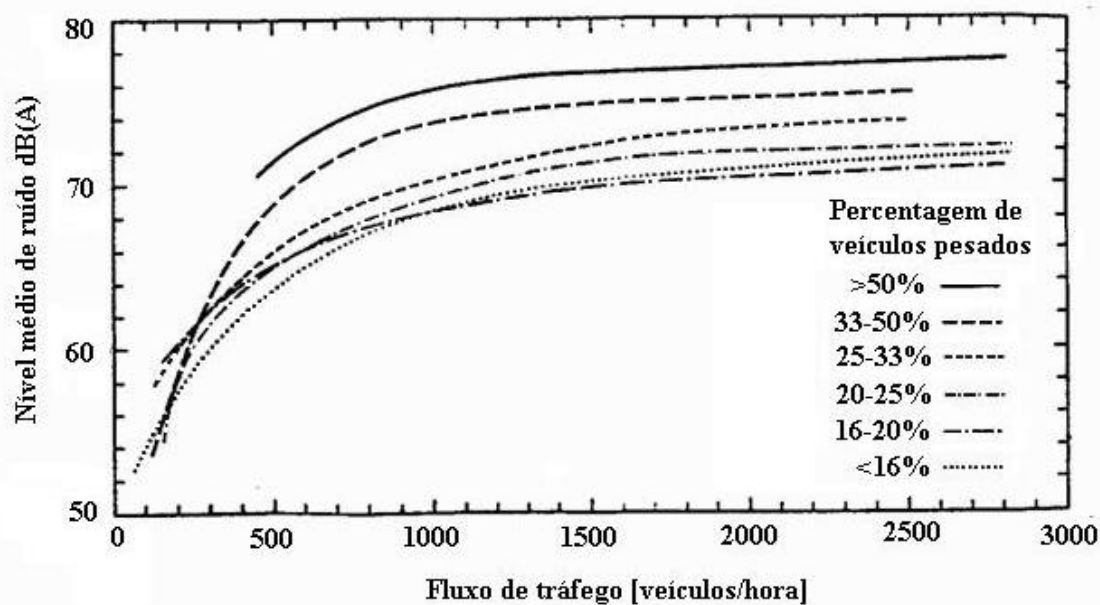


Figura 4 - Nível médio de ruído gerado por uma via de tráfego em função do fluxo de tráfego para diferentes porcentagens de veículos pesados (STEPHENSON e VULKAN, 1968).

O nível de ruído de uma via aumenta com o aumento da velocidade de tráfego, tanto para veículos pesados como para leves, porém, o efeito é mais pronunciado em veículos leves. Caminhões tendem a manter a rotação do motor em todas as velocidades, logo, a variação do nível de ruído com a velocidade é menor. Com o aumento de 50% na velocidade de tráfego, o ruído de veículos pesados tem um aumento médio de +3,5 dB(A), em comparação ao aumento médio de +5,5 dB(A) para veículos leves (IRVINE e RICHARDS, 1983).

2.2.2 Fatores que influenciam na propagação do ruído

Para pontos distantes da via de tráfego, diversos fatores agem sobre a propagação, alterando seu comportamento. Os fatores mais importantes que agem na propagação do ruído podem ser divididos em influências meteorológicas (absorção atmosférica, vento, temperatura, umidade e precipitações) e influências urbanas (obstáculos, barreiras, efeitos do piso e de fachadas).

A atenuação do ruído, à medida que esse se propaga no ar, depende principalmente da temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica (BRUEL & KJAER, 2001). Durante a propagação da onda sonora pelo ar, parte da energia sonora é convertida em calor, mais

significativamente para grandes distâncias e para as altas frequências. A absorção é devida, em parte, à viscosidade e a condução de calor do ar, mas, principalmente, pela vibração das moléculas de oxigênio e nitrogênio, facilitado pela presença da umidade no ar (GERGES, 1992). A ação do ar se apresenta mais acentuadamente em frequências sonoras acima de 2 kHz com atenuação média de -2 dB para cada 100 metros de distância (BURNS, 1973). Porém, o efeito da absorção atmosférica nas baixas frequências é praticamente desprezível (BRÜEL & KJAER, 2001).

Em áreas externas, a velocidade do vento normalmente aumenta conforme aumenta a altitude e, dependendo da diferença entre as velocidades, podem ocorrer mudanças significativas na trajetória do som. Na região localizada antes da fonte, em relação à direção do vento, o efeito do “*upwind*” faz com que as ondas sonoras sejam direcionadas para cima criando áreas de sombra acústica, onde os níveis de ruído diminuem. Na região depois da fonte, o efeito de “*downwind*” faz com que as ondas sonoras se curvem em direção ao solo, aumentando, então, o nível de ruído (GERGES, 1992). Dependendo da velocidade do vento e da distância da fonte, nas áreas em condição *downwind* o nível do ruído pode se elevar um pouco, porém nas áreas em condições de *upwind* ou *sidewind* (vento incidente lateral), o nível sonoro pode ser atenuado em até -20 dB. No entanto, para distância da fonte menor que 50 m, a influência do vento pode ser desprezada (BRÜEL & KJAER, 2001).

O gradiente da temperatura atmosférica cria um efeito similar ao gradiente da velocidade do vento, porém, de maneira uniforme para todas as direções a partir da fonte. Em um dia claro e sem vento, a temperatura atmosférica diminui com a altitude e, assim, a velocidade do som diminui conforme aumenta a altitude. Esse efeito, faz com que as ondas sonoras se curvem para cima, criando uma zona de sombra acústica, com atenuação do ruído na área em torno da fonte (BRÜEL & KJAER, 2001). No caso de inversão térmica, que ocorre normalmente no final de uma noite calma quando o ar próximo ao solo está mais frio, ocorrerá o efeito inverso e as ondas sonoras se curvarão em direção ao solo, aumentando o nível de ruído na área em torno da fonte.

Barreiras sonoras podem ser naturais, devido à topografia da região, ou artificiais, criadas por alguma construção projetada ou não para esse fim. Na prática, é muito difícil que uma barreira construída ao longo de uma via alcance mais de -10 dB de atenuação da energia sonora. Para agir com eficiência, uma barreira acústica deve bloquear a linha de visão entre a fonte e o receptor, para produzir uma mudança angular na trajetória direta das ondas sonoras

no plano vertical e horizontal, causando atenuação em consequência do efeito de difração da onda sonora. Para que a transmissão da energia sonora através da barreira não comprometa sua performance, é necessário que a atenuação na transmissão seja cerca de -6 dB maior que a difração. Para isso, é suficiente uma densidade superficial de 10 a 20 kg/m² (GERGES, 1992). A zona de sombra acústica será maior quanto maior a altura da barreira, mais alta a frequência da onda sonora e mais próxima a barreira estiver da fonte sonora ou do receptor. O comprimento da barreira também deve ser considerado, para que o caminho da onda sonora no plano horizontal seja equivalente ao caminho no plano vertical, por sobre a barreira. A maneira mais efetiva de atenuação da propagação do ruído, é com a criação de muros de arrimo ou montes cobertos por vegetação (STEPHENSON e VULKAN, 1968). Para grandes distâncias, os efeitos atmosféricos podem fazer com que as ondas sonoras se curvem em direção ao solo, reduzindo a atenuação efetiva de uma barreira instalada próximo à fonte (IOA, 1996). No uso de barreiras sonoras altas e opacas ao longo de vias de tráfego, deve-se considerar também os efeitos negativos, tais como, o prejuízo da iluminação natural, o perigo de sombras acentuadas criadas na superfície da via e os efeitos emocionais negativos para motoristas e pedestres.

Quando uma onda sonora atravessa um grupo de obstáculos como, por exemplo, árvores ou construções, ela é parcialmente absorvida. Quanto maior a frequência da onda sonora e maior a distância percorrida por entre o grupo de obstáculos, maiores serão as perdas. A atenuação de um ruído através de um bosque, para cada 100 metros, varia de -3 dB na frequência de 125 Hz, à -11 dB na frequência de 2 kHz. Porém, essa atenuação somente ocorrerá se as árvores forem plantadas bem próximas, com folhagem densa e altura maior que 6m (BURNS, 1973).

Quando a propagação do som da fonte até o receptor acontece próximo ao piso, parte da energia sonora é absorvida. Os efeitos do piso serão diferentes para superfícies acusticamente reflexivas, tais como o concreto, ou absorvedoras, tais como um gramado, dependendo também da frequência da onda sonora e da altura da fonte e do ponto receptor em relação ao piso (BRÜEL & KJAER, 2001). A combinação da onda direta com a onda refletida pelo piso, pode criar arranjos capazes de atenuar fortemente algumas frequências, através de interferências destrutivas, e não agir sobre outras. A atenuação média, para cada 30m percorridos, é de cerca de -1,0 dB(A) para gramados ou terra fofa, podendo chegar a -5,0 dB(A) para vegetações densas acima de 1m de altura (JOHNSON e SAUNDERS, 1968). A atenuação causada para cada 100m percorridos em uma área gramada, pode ser estimada em -

1 dB na frequência de 125 Hz e -3 dB na frequência de 2 kHz (BURNS, 1973). Mesmo para grandes distâncias, os efeitos de atenuação pelo piso nas frequências abaixo de 200 Hz são desprezíveis (JOHNSON e SAUNDERS, 1968), assim como para pontos acima de 3m de altura em relação à vegetação (STEPHENSON e VULKAN, 1968).

Quando as ondas sonoras chocam-se contra uma superfície, parte da energia acústica é refletida, parte é absorvida e parte é transmitida através desta. Se a absorção e a transmissão são pequenas, caso geral de fachadas de edifícios, a superfície pode ser classificada como acusticamente refletora. A quantidade de energia absorvida, assim como a direcionalidade das ondas refletidas, são maiores para as altas frequências e dependem diretamente das propriedades físicas e geométricas da superfície. A presença de grandes superfícies verticais reflexivas, tais como fachadas de edificações e muros, próximas à fonte ou ao ponto receptor, pode aumentar o nível sonoro e ainda ampliar a influência de fontes indiretas. O nível sonoro a 0,5m de uma fachada plana pode aumentar em até +3 dB (IOA, 1996). JOHNSON e SAUNDERS (1968) efetuaram medições onde havia um bloco de edifícios ao longo de uma via de tráfego. Do lado oposto aos pontos de medição, a cerca de 15m da via, o nível médio do ruído foi 3,5 dB maior que em condições semelhantes, sem a presença de edifícios. Em locais onde havia construções em ambos os lados da via, o nível de ruído médio medido foi 4,5 dB maior.

2.3 INDICADORES PARA A AVALIAÇÃO DE RUÍDO DE TRÁFEGO

Neste item são apresentados os principais indicadores para avaliação de ruído de tráfego, utilizados nas principais regulamentações internacionais. Esses indicadores são capazes de caracterizar o comportamento médio do ruído gerado por uma via.

Baseado no princípio de energia equivalente, hipótese que afirma que o efeito global do som é proporcional à soma total da energia sonora recebida, independentemente da distribuição temporal desta, o nível de energia sonora equivalente, Leq , é igual à soma das contribuições de uma série de eventos sonoros, integrados em um intervalo de tempo de interesse. O indicador Leq é utilizado para resumir o ruído emitido pela via, em um único valor representativo da energia sonora típica emitida em uma condição específica (Berglund, et al., 1999). No caso de uma via de tráfego, as variações do nível de ruído no tempo são

bastante complexas e a análise estatística do comportamento temporal do nível sonoro do ruído deve ser executada através do cálculo do Leq , definido como:

$$Leq = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{P(t)}{P_0} \right)^2 dt \quad (5)$$

Onde T é o tempo total de medição em segundos, $P(t)$ é a pressão acústica instantânea em N/m^2 e P_0 é a pressão acústica atmosférica de referência, igual a $2 \times 10^{-5} N/m^2$.

O nível de ruído equivalente, com a aplicação da curva de ponderação A, $Leq(A)$, é o indicador mais importante em medições de ruído de vias de tráfego. A utilização do $Leq(A)$ permite a análise do ruído de tráfego, através da combinação de eventos menores que constituem um período maior. Para que esse valor possa ser utilizado para representar corretamente o nível de ruído de situações similares, deve-se definir com clareza a situação em que o $Leq(A)$ foi medido.

A análise estatística dos níveis de ruído de uma via de tráfego, provê informações importantes sobre a variabilidade dos níveis de ruído e, também, sobre a maneira como o ruído contribui no ruído ambiente. Indicadores da frequência acumulada da ocorrência dos níveis de ruído eventuais por um certo período, $L\%$, têm a propriedade de evidenciar comportamentos mais específicos da fonte. A partir da avaliação de curvas $L\%$ do nível de ruído em vias de tráfego, para diversas situações, JOHNSON e SAUNDERS (1968) identificaram que o comportamento da porção próxima a 100% é controlado pelo ruído ambiente, o qual varia de maneira similar ao nível de ruído médio, com aumento de +6 dB para o dobro do fluxo de tráfego. Por outro lado, a porção da curva próxima a 0% não é controlada, exatamente, pelo valor médio dos níveis de ruído máximos, gerados pela passagem de veículos individuais, mas sim, pelos picos de ruído emitidos apenas pelos veículos mais ruidosos. Esses estudos concluíram que a percentagem da distribuição do ruído no tempo, na faixa entre 10% e 90%, é suficientemente estável para que esses valores possam caracterizar respectivamente os níveis de ruído eventuais máximos, $L10$, e de ruído ambiente, $L90$, de uma via. A distâncias mais próximas da via, cada veículo é percebido individualmente e, então, o valor $L10$ é claramente distinguido do valor $L90$ (STEPHENSON e VULKAN, 1968). Quanto menos estável é o ruído, maior é a diferença entre os valores $L10$ e $L90$ em um mesmo ponto. Em distâncias maiores, o nível de ruído de cada veículo é mais fortemente atenuado que o nível de ruído distribuído pela via e, dessa forma, o valor dos

indicadores L10 e L90 tendem a convergir (BURNS, 1973). A Figura 5 compara o efeito da atenuação com o aumento da distância, para diferentes valores de L% (HASSAL e ZAVERI, 1968). Atualmente o indicador L50 é raramente utilizado como indicador do ruído médio de uma via de tráfego. Para vias com tráfego contínuo, o valor Leq situa-se cerca de 3 dB abaixo de L10 e cerca de 1 dB a 2 dB acima do valor L50.

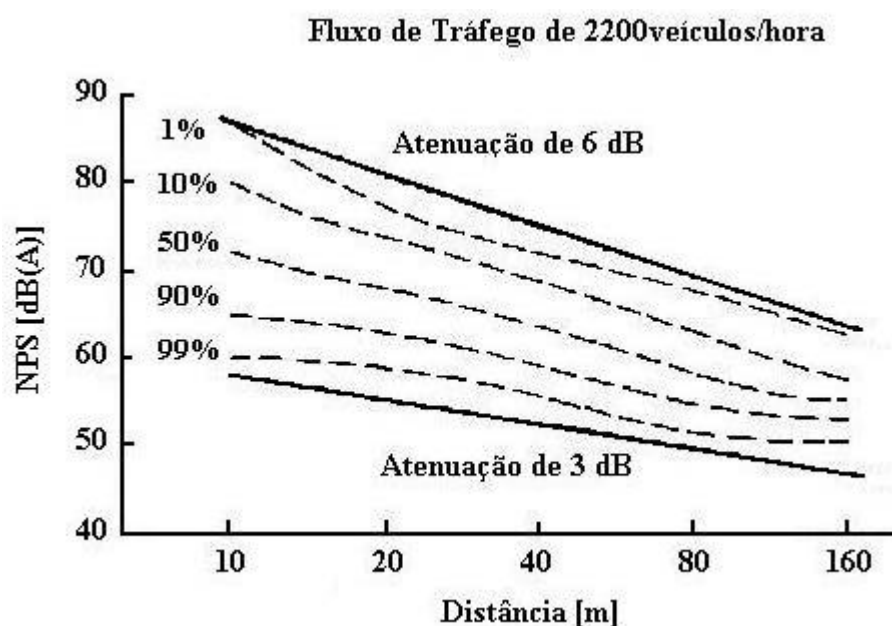


Figura 5 - Atenuação do ruído de tráfego pela distância para diferentes valores L% (HASSAL e ZAVERI, 1968).

Estudos feitos por ALVES FILHO (1997), concluíram que a composição de tráfego tem influência significativa nos valores dos indicadores de ruído. Enquanto L10 e Leq são influenciados pelo percentual de veículos pesados, o L90 é influenciado pelo percentual de veículos leves. Entretanto, esse mesmo estudo conclui que essa influência nos níveis de ruído é, também, função do modo de condução dos motoristas e da qualidade de manutenção dos veículos.

O nível sonoro máximo, L_{máx}, pode ser definido como o valor máximo de nível de ruído, ocorrido em um dado período de tempo. O L_{máx} ponderado pela curva A é um importante indicador utilizado para caracterizar a interferência sonora máxima eventual causada por uma via de tráfego (BERGLUND et al., 1999).

2.3.1 Medidas reguladoras

Regulamentações podem ser implantadas, através da limitação dos valores quantificados pelos indicadores de ruído anteriormente apresentados. A Tabela 2 mostra os limites de emissão de ruído permitidos para novas vias de tráfego em diferentes países (BRÜEL & KJAER, 2001). Os limites são, freqüentemente, entre 50 dB(A) e 55 dB(A) para valores Leq. Esses valores são os mesmos recomendados pela Organização Mundial da Saúde (BERGLUND et al., 1999). No Brasil não existe nenhuma legislação federal específica que regule o limite máximo permitido para emissão de ruído por vias de tráfego.

Tabela 2 - Limites de emissão de ruído de tráfego (BRÜEL & KJAER, 2001).

País	Indicador	Período diurno	Repouso	Período noturno
Austrália	L10, 18h	60	-	55
Áustria	Leq(A)	50-55	-	40-55
Canadá	Leq(A)	50	-	50
Dinamarca	Leq(A),24h	55	55	55
França	Leq(A)	60-65	-	55-57
Alemanha	Leq(dn)	50-55	-	40-45
Holanda	Leq(A)	50	45	40
Espanha	Leq(A)	60	-	50
Suécia	Leq(A),24h	55	55	55
Reino Unido	Leq(A)	55	-	42
Suíça	Leq(dn)	55	-	45

2.4 CONCLUSÕES

O ruído gerado por vias de tráfego tem um comportamento bastante complexo, influenciado por diversos fatores naturais e urbanos. O indicador Leq possibilita quantificar o nível do ruído de uma via de tráfego e, por isso, apresenta-se como um bom indicador para avaliar a interferência sonora de uma via de tráfego. A investigação feita neste Capítulo mostra que o nível de ruído gerado por uma via pode ser minimizado através de decisões

ainda em projeto, principalmente por: configuração da implantação urbana, tipo de pavimentação, gradiente da via, uso de barreiras, limitação do fluxo e restrição da composição de tráfego, número de via e da velocidade máxima permitida. Porém, a complexidade e a imprevisibilidade dos efeitos que influenciam na propagação sonora, são fatores que devem ser discutidos para qualquer decisão de planejamento urbano. No próximo Capítulo, serão investigados os critérios de qualificação acústica em salas de aula, para que possa ser estabelecida a influência do ruído de tráfego nessas atividades.

3 CAPÍTULO - QUALIFICAÇÃO ACÚSTICA EM SALAS DE AULA

Em uma sala de aula, onde o objetivo principal é a transmissão de informação através da palavra falada, o foco de interesse é a inteligibilidade, ou seja, a boa compreensão pelo aluno do que é proferido pelo professor. Para compreender a interferência de ruídos na fala, é preciso entender os comportamentos da percepção do ouvido humano, da fala e, também, do ruído. Para que seja possível avaliar a inteligibilidade em uma sala de aula, é preciso conhecer as fontes sonoras envolvidas e estabelecer, estatisticamente, seu comportamento acústico médio dentro de certas condições acústicas do ambiente. Neste Capítulo serão apresentados e analisados os parâmetros envolvidos para a avaliação e previsão da inteligibilidade da fala em uma sala de aula.

3.1 COMPORTAMENTO DA AUDIÇÃO HUMANA E PERCEPÇÃO DA FALA

A inteligibilidade da fala em uma sala, isto é, clareza e audibilidade adequadas para o bom entendimento da informação, é dependente da razão entre a energia sonora da fala e a energia sonora do ruído ambiente. Para avaliar essa relação, é preciso compreender a sensibilidade do ouvido humano e como ocorre a interferência de um ruído na percepção da fala.

A impressão auditiva de um sinal sonoro é definida pela audibilidade, *loudness*, quantificado pelo resultado da avaliação estatística do julgamento da impressão auditiva de um grande número de indivíduos, sob condições controladas (BURNS, 1973). A sensação da audibilidade de um som depende da distribuição da energia sonora no espectro de frequência. O ouvido humano é menos sensível às baixas frequências do que às altas frequências. Para os tipos de ruído usualmente encontrados em áreas urbanas, o dobro de audibilidade corresponde a um aumento de 10 dB no nível de pressão sonora (BUILDING BULLETIN, 1975). O julgamento subjetivo de “metade da audibilidade” de um ruído é, então, equivalente a uma redução para um décimo da energia sonora original. A partir da avaliação da audibilidade, é possível definir as áreas de sensibilidade auditiva do ouvido humano. Dentro da área da sensibilidade auditiva humana, a área de sensibilidade para fala é bastante limitada.

Os elementos lingüísticos básicos da fala são chamados fonemas, sons significativos articulados pelo sistema vocal. Fazem parte também da comunicação componentes temporais, como a variação na força, na acentuação e na rítmica das palavras (BERGLUND e LINDVALL, 1995). A 1 m de distância do orador, o nível sonoro da voz pode chegar a 89 dB(A), porém, é considerado para o esforço vocal normal nessa distância, o valor igual a 58 dB(A) para voz masculina e 55 dB(A) para voz feminina, com desvio padrão de 4 dB (BRADLEY, 1985). Porém, o valor médio do nível sonoro da voz, medido em salas de aula de uma universidade, foi de 50,7 dB(A), com desvio padrão de 3,7 dB e uma variação $\pm 1,3$ dB(A) da média, entre a voz masculina e feminina (HODGSON et al., 2001). Foi observado, também, que o nível sonoro da voz aumenta involuntariamente, para compensação do nível do ruído ambiente na sala.

O ruído ambiente em uma sala de aula pode ser composto por equipamentos ou atividades internas e, também, por fontes provindas de instalações urbanas ou atividades transitórias externas. Os níveis de ruído ambiente em salas de aula dependem de uma série de fatores, tais como: número e idade de alunos por sala, geometria da sala, distribuição das atividades dentro do edifício escolar, localização da escola e suas salas de aula em relação às fontes de ruído externas, qualidade de isolamento sonoro do método construtivo do edifício escolar, etc (AIREY, 1998). HODGSON et al. (2001) mediram os níveis sonoros de fontes internas típicas durante atividade de leitura em salas de aula, em uma universidade. O ruído ambiente total apresentado ficou em torno de 44 dB(A).

Uma pesquisa (DOCKRELL et al., 2001), através de questionário em 2000 escolas primárias em área urbana, concluiu que a ausência do ruído externo é considerada, pelos alunos, como uma das condições mais importantes para boa audição dentro da sala, e que as fontes de ruído mais freqüentemente ouvidas na sala de aula é de carros (71%), sirenes (61%) e caminhões (58%). A comparação entre o envelope de freqüência típico do ruído de tráfego pesado, à 10m de distância da fonte e o envelope de freqüência típico da voz, à 1m de distância do orador, é mostrado na Figura 6 (BUILDING BULLETIN, 1975). O planejamento, projeto e construção de uma edificação escolar, devem, então, criar condições para atenuação eficiente do ruído de trafego de vias próximas.

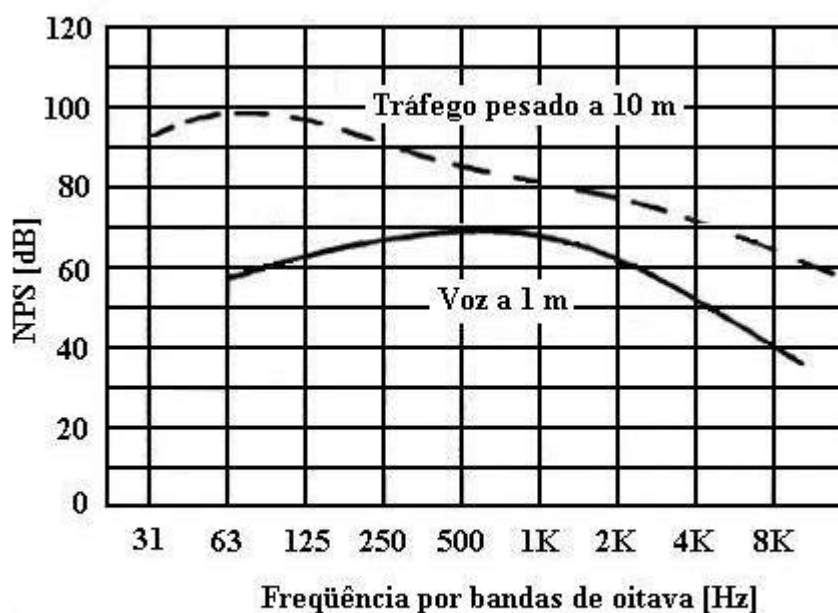


Figura 6 - Comparação entre típicos espectros de frequência do ruído de tráfego e da voz (BUILDING BULLETIN, 1975).

No caso de uma escola, um ruído é geralmente sentido pelo grau de interferência destas atividades da sala de aula, causado principalmente pelo mascaramento sonoro das informações proferidas pelo professor, por meio da fala (BUILDING BULLETIN, 1975). Basicamente, quanto mais energia sonora um ruído contiver nas frequências importantes para a fala, maior será o efeito de mascaramento sonoro e a interferência na inteligibilidade. Entretanto, a relação entre o espectro, nível sonoro e características temporais de um ruído e a inteligibilidade da informação falada, é complexa. Em intensidades sonoras baixas, um ruído é capaz de mascarar sons nas frequências em torno da própria frequência, porém, em intensidades sonoras típicas em salas de aula, os efeitos de mascaramento são mais pronunciados nas frequências acima das do ruído (ZWIKER, 1990). Mesmo com mascaramento de algumas frequências da fala, ainda será possível entender a informação contida, devido a aspectos subjetivos e sociais. Porém, a interpretação requerida para compensar o mascaramento, reverte-se em desgaste adicional para o ouvinte. A faixa do espectro de frequência entre 200 Hz e 7 kHz, é que mais contribui para inteligibilidade.

3.2 TESTES DE INTELIGIBILIDADE

Testes são utilizados para medir a inteligibilidade da fala em salas construídas. Nesses testes, um orador lê sílabas aleatórias, palavras monossilábicas ou sentenças, e ouvintes

distribuídos pela sala escrevem o que foi entendido ou escolhem de uma lista de possíveis alternativas. A percentagem de itens ouvidos corretamente, é a medida do grau de inteligibilidade (COFFEN et al., 2000). Gravações de listas de palavras aleatoriamente escolhidas podem ser utilizadas no lugar de um orador, evitando-se que haja memorização por parte dos ouvintes, influência da leitura labial e da variação entre diferentes características de pronuncia e intensidade da fala, entre oradores. Para que os resultados sejam consistentes, os testes devem ser feitos em uma situação cotidiana e o orador, ou a fonte sonora, deve estar localizado no lugar usual do professor. Os ouvintes devem estar sentados nos locais onde há a pior situação acústica da sala, normalmente no fundo desta ou próximo a áreas ruidosas da sala. Um valor mínimo de 90% de acerto é considerado uma inteligibilidade aceitável. Adultos obtêm, em média, uma inteligibilidade 10% maior que crianças. Estudantes com problemas de audição, ou que não dominam a língua, apresentam valores menores que para crianças (COFFEN et al., 2000).

Mais recentemente, vem sendo proposta uma nova abordagem para os testes em salas reais, onde os ouvintes julgam a dificuldade de audição de palavras lidas, utilizando os mesmos procedimentos dos testes de inteligibilidade (KOBAYASHI et al., 2001). O julgamento deve ser: (1) “sem dificuldade”, (2) “um pouco difícil”, (3) “bastante difícil” e (4) “extremamente difícil”. O valor de dificuldade de audição das palavras é igual à percentagem do número total de respostas, subtraindo o número de respostas (1) “sem dificuldade”. Os resultados de testes preliminares demonstraram que o teste de dificuldade de audição de palavras tem alta correlação com a inteligibilidade da fala e que esse teste é capaz de avaliar a qualidade de transmissão da fala sem que a memorização das palavras influencie nos resultados.

3.3 INDICADORES DO GRAU DE INTERFERÊNCIA DE UM RUÍDO NA FALA

Serão apresentados a seguir, os indicadores que avaliam o efeito do mascaramento da fala por um ruído sem considerar a interferência das características acústicas da sala nos níveis sonoros do sinal e do ruído.

O Índice de Articulação, *Articulation index* (AI), avalia a relação entre o nível sonoro das sílabas faladas e o nível de um ruído contínuo, medido num ambiente. O AI leva em consideração, a influência de cada banda de frequência no mascaramento da fala. As

freqüências entre 250 Hz e 7 kHz são divididas em 20 bandas, cada uma contribuindo com 5% da inteligibilidade total (BERGLUND e LINDVALL, 1995). A diferença entre o nível médio da fala e o nível médio do ruído é calculada para cada uma dessas 20 bandas de freqüência e os valores resultantes são combinados para gerar um valor único. Estudos demonstraram que o máximo valor de 0,9 para AI equivale a 100% de inteligibilidade (BRADLEY, 1985). Um valor igual a 0,6 é considerado suficiente para uma boa inteligibilidade da fala, enquanto valores abaixo 0,3 são considerados inadequados.

O Nível de interferência na fala (SIL) foi desenvolvido como uma simplificação do AI. O indicador é calculado pela média aritmética do nível do ruído nas bandas de oitava centradas nas freqüências de 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz e 4000 Hz, consideradas mais importantes para inteligibilidade da fala. Para avaliação adequada de um ruído com fortes componentes nas baixas freqüências, é indicado considerar, também, a banda de 250 Hz (BRADLEY, 1986a). O SIL é avaliado em função do nível sonoro da voz, da distância entre os interlocutores e da natureza da conversação. Para discussões em grupo, com nível de voz normal a 9m de distância, é estabelecido o valor máximo de SIL igual a 35 dB. Acima de SIL igual a 55 dB, não é considerado possível qualquer tipo de conversação com nível de voz normal (BUILDING BULLETIN, 1975).

A razão sinal/ruído (S/R), é uma comparação simples muito útil para a estimativa da influência do ruído ambiente na inteligibilidade da fala. O S/R, em dB(A), é igual ao nível sonoro da voz do orador, subtraído do nível de ruído ambiente no local:

$$S / R = 10 \log \left(\frac{P_{orador}}{P_0} \right)^2 - 10 \log \left(\frac{P_{ruído}}{P_0} \right)^2 \quad (6)$$

onde P_{orador} é a pressão sonora da voz do orador, $P_{ruído}$ é a pressão sonora do ruído perturbador e P_0 é a pressão sonora de referência no ar $2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$.

O S/R é, normalmente, pior no fundo das salas, onde o nível sonoro da voz é menor, ou perto de uma fonte de ruído, onde o ruído é mais alto, bem como perto de equipamentos, ventiladores e, também, das janelas voltadas para áreas ruidosas. Investigações de BRADLEY (1986a,b) demonstraram que um S/R de +15 dB(A) corresponde a 100% de inteligibilidade da fala e que S/R igual a +10 dB(A) diminui apenas levemente a inteligibilidade. Mesmo para crianças com audição normal, em salas de aula com valor de S/R menor que +10 dB(A), a

inteligibilidade é significativamente degradada (COFFEN, 2000). Para crianças com alguma dificuldade auditiva, ou que não dominem perfeitamente a língua local, o S/R deverá ser +15 dB no mínimo. Para atingir o valor recomendado de S/R igual a +15 dB(A), considerando um valor médio para o nível sonoro vocal feminino ‘normal’ de 55 dB(A), menos o desvio padrão de 4 dB(A), aplicando uma diminuição de -2 dB(A) para os lugares mais distantes de uma típica sala de aula de 300 m³, o nível de ruído ambiente máximo deve ser de 34 dB(A) (BRADLEY 1986b). Para a mesma situação, em salas de 1000 m³, o ruído ambiente máximo deve ser de 27 dB(A) (BRADLEY, 1986a).

3.4 REVERBERAÇÃO ACÚSTICA DE UMA SALA

A influência da seqüência complexa de reflexões sonoras, causadas pelas superfícies internas de um ambiente, é denominada reverberação de uma sala. Foi demonstrado por W. Sabine, que a reverberação em uma sala aumenta com o volume e diminui com a quantidade de superfícies absorvedoras, inclusive de pessoas. Além disso, é afetada pela forma da sala e disposição dos objetos internos, que são capazes de direcionar as ondas sonoras (GERGES, 1992). Quanto maior a reverberação em uma sala, maior o nível sonoro no ambiente, desde que não haja efeitos de mascaramento (ZWICKER, 1990).

Enquanto algumas reflexões degradam a inteligibilidade da fala, outras podem melhorá-la (BRADLEY et al., 1999). As primeiras reflexões recebidas pelo ouvido humano são subjetivamente integradas ao som direto, aumentando a audibilidade deste e, conseqüentemente, a inteligibilidade da fala. No entanto, as reflexões posteriormente recebidas não são integradas ao som direto, fazendo com que os sinais sonoros se interfiram, causando a degradação da inteligibilidade. Para uma completa avaliação da sala de aula, a reverberação deve ser avaliada para cada uma das bandas de oitava importantes para a fala. Acima de 500 Hz, a reverberação aumenta moderadamente com o aumento da frequência sonora, logo, o valor de TR na banda de 1 kHz pode ser considerado representativo, para a faixa entre 500Hz e 4KHz (BISTAFÁ e BRADLEY, 2000).

A forma geométrica, disposição e qualidade acústica das superfícies internas de uma sala, são fatores determinantes na intensidade das reflexões, que atuam diretamente na qualidade acústica final do ambiente. A energia acústica deve estar bem distribuída no ambiente, atingindo homogeneidade de energia, através de uma adequada dispersão do som.

Em salas de aula pequenas, particularmente não absorvedoras, o nível sonoro da voz varia pouco em diferentes posições na sala. Ao contrário, em salas grandes e bastante absorvedoras, o nível sonoro da voz diminui consideravelmente, quanto maior a distância do ouvinte em relação ao orador (HODGSON, 2001). Nesse caso, podem ser utilizados painéis para reforçar o som direto da fala, dirigindo as primeiras reflexões para áreas de pouca energia sonora. A presença de alunos tem efeito significativo no aumento da absorção sonora das reflexões, porém, o nível de ruído ambiente interno também aumenta pela atividade dos próprios. Logo, a área onde estes se localizam deve ser acusticamente tratada, para atenuar o ruído gerado pelos próprios. Deve-se, também, distribuir materiais absorvedores em lugares estratégicos da sala, para prevenir os efeitos de reflexões prejudiciais.

3.5 INDICADORES DA REVERBERAÇÃO ACÚSTICA EM SALAS DE AULA

A reverberação em uma sala pode ser quantificada por vários indicadores. A razão entre as reflexões úteis e prejudiciais (C50), é o indicador que melhor caracteriza a influência da reverberação na inteligibilidade da fala, porém, o tempo de reverberação (TR) é o indicador mais amplamente utilizado para avaliação da reverberação em salas de aula. Apesar de, teoricamente, o valor de C50 poder variar sem mudanças no valor de TR, testes demonstram que esses indicadores apresentam uma boa correlação em salas de aula reais (BRADLEY 1986b e HODGSON, 2001).

A acústica de uma sala é, tradicionalmente, caracterizada pelo Tempo de Reverberação (TR), definido como o tempo para que o valor inicial da energia sonora diminua 60 dB, depois de cessada a emissão. Um TR excessivo causa a superposição das sílabas, principalmente das vogais ainda em reverberação, prejudicando a compreensão das sílabas pronunciadas logo a seguir. O excesso de reverberação do som das vogais, que compreendem as frequências mais baixas da fala, pode ainda causar o mascaramento das consoantes, que compreendem as frequências mais altas da fala e carregam a maior parte da informação para entendimento da fala (BISTAFA e BRADLEY, 2000). Com o TR demasiado curto, as sílabas emitidas soam secas e desconectas, dificultando sua ligação e prejudicando o reconhecimento das palavras. O TR é diretamente proporcional ao volume interno da sala e inversamente proporcional à área e ao coeficiente de absorção sonora das superfícies internas no ambiente. O coeficiente de absorção, medido em laboratório, é a fração da energia sonora total incidente que um material é capaz de absorver, em uma dada frequência.

Apesar da necessidade de estabelecer-se o valor de TR ainda em projeto, NEUBAUER (2001) questiona a precisão das formulações e simulações computacionais para previsão do TR em uma sala, principalmente com a utilização de valores padronizados para o coeficiente de absorção de materiais. Pesquisas mostraram, que a diminuição do TR para valores entre 0,4 s a 0,6 s nas médias frequências, foi considerada essencial para atingir a satisfação dos professores em relação à performance acústica da sala (DODD et al., 2001). A redução do TR é, também, muito importante para a redução dos níveis de ruído internos à sala. Através do uso de materiais e revestimentos internos visando adequação do TR, MACKENZIE (2000) mediu uma redução média de 5 dB(A) dos níveis de ruído ambiente em uma sala de aula vazia e de até 9 dB para as salas ocupadas. Testes de BRADLEY (1986b) em escolas sugerem que há uma perda de 12% a 14% de inteligibilidade para cada 1 segundo de aumento do TR.

Para avaliação da contribuição positiva da reverberação em salas para oratória, é considerado o limite de 0,05 segundo entre as reflexões anteriores úteis e as reflexões posteriores prejudiciais à inteligibilidade da fala. A razão logarítmica entre as reflexões anteriores a 0,05 segundo após o recebimento de sinal direto (E) e as reflexões posteriores a 0,05 segundo (L), é o indicador dos efeitos da reverberação acústica de uma sala (C50) e tem apresentado boa correlação com a avaliação subjetiva da clareza e da inteligibilidade da fala:

$$C50 = 10 \log (E / L) \quad (7)$$

Um outro indicador, apresentado na equação (8), avalia a razão sonora linear entre a reverberação anterior e a reverberação total. Conhecido como Definição (D50) este é, matematicamente, exatamente relacionado com o C50. Porém, estudos recentes indicam que o C50 é um melhor indicador da qualidade acústica de salas de aula, pois possui uma relação linear com a avaliação subjetiva da clareza da fala (BRADLEY et al., 1999).

$$D50 = \int_0^{0,05} p^2(t)dt / \int_0^{\infty} p^2(t)dt \quad (8)$$

Com o aumento da reverberação em uma sala, ocorre um aumento nos níveis sonoros reverberantes, que se somam aos níveis sonoros diretos da voz e do ruído e, conseqüentemente, influenciam no valor de S/R na posição do ouvinte. A quantidade relativa a qual os níveis sonoros da voz e do ruído aumentam, com o aumento da reverberação, irá depender das distâncias relativas da fonte de voz e da fonte de ruído, em relação ao ouvinte

(HODGSON e NOSAL, 2002). Para fontes próximas, o som direto é dominante e a contribuição da reverberação é mínima. Para fontes distantes, a influência da reverberação é bastante grande e o aumento no nível sonoro direto é considerável. Em uma sala, para uma fonte de ruído mais longe do ouvinte do que a fonte da voz, os níveis de ruído aumentam mais com o aumento da reverberação do que os níveis da voz, diminuindo o S/R e, por fim, a inteligibilidade. Se a fonte da voz estiver mais longe do ouvinte que a fonte de ruído, então a reverberação irá contribuir mais para o nível da voz do que para o nível do ruído e o S/R aumentará, assim como a inteligibilidade. Se as distâncias são iguais, os níveis variam da mesma forma e o S/R não se altera, assim como a inteligibilidade (HODGSON e NOSAL, 2002). A investigação de BRADLEY et al. (1999), de condições simuladas em laboratório, representativas de toda a faixa de condições acústicas usuais para salas de aula, concluiu que melhoras na inteligibilidade da fala a partir da variação da reverberação, indicada pelo valor de C50, só foram significativas para situações com níveis de ruídos altos, indicados pelo valor de S/R. Para S/R igual a +10 dB, foi verificada uma melhora de apenas 2,5 % na inteligibilidade e, mesmo para S/R igual a 0 dB, o máximo efeito de C50 na inteligibilidade foi de 10%. Por outro lado, o aumento do nível relativo do sinal sonoro de interesse, indicado por S/R, levou à melhora significativa na inteligibilidade da fala, para todos os valores de C50. O aumento no S/R causou uma melhora de 15% na inteligibilidade, mesmo para C50 igual a +9 dB, ou seja, com reverberação acústica ótima em uma sala. Para a pior acústica, C50 igual a +1 dB, a inteligibilidade melhorou em até 25% com S/R igual a +10 dB. Medições efetuadas por ASTOLFI et al. (2001), em salas reais, demonstraram o mesmo comportamento. Dessa forma é possível afirmar que, para alcançar uma boa inteligibilidade da fala em salas de aula, é prioritário garantir baixos níveis de ruído ambiente, inclusive para que sejam minimizados os efeitos prejudiciais causados pela reverberação inadequada da sala.

3.6 INDICADORES DE INTELIGIBILIDADE DA FALA EM SALAS

Os indicadores para avaliação da inteligibilidade da fala em salas devem relacionar o nível da fala, o nível do ruído e os efeitos da reverberação da sala. A seguir, serão apresentados os indicadores mais amplamente utilizados para prever a inteligibilidade da fala em uma sala. Testes de inteligibilidade em campos sonoros simulados em laboratório, efetuados por BRADLEY et al. (1999), mostraram que esses indicadores consideram com boa precisão os efeitos combinados de S/R e C50.

O indicador da porcentagem da perda de articulação das consoantes, %ALcons, é baseado essencialmente na avaliação da razão da quantidade de consoantes perdidas ou mal entendidas por um ouvinte, em um ponto particular de uma sala, com a qual uma escala de inteligibilidade é relacionada (BRADLEY et al., 1999). O %ALcons considera os efeitos dos níveis sonoros direto e reverberante da fala e do ruído, o valor de TR em 2 kHz, as dimensões da sala e a distância entre o ouvinte e o orador. Quanto menor a porcentagem de perda de articulação das consoantes, melhor é considerada a inteligibilidade. O valor de %Alcons, ideal para inteligibilidade da fala em salas de aula, é de menos que 5% (MACKENZIE, 2000).

O Índice de transmissão da fala, STI, assume que a degradação da inteligibilidade da fala em uma sala é relacionada com a redução da amplitude de modulação do sinal sonoro. O STI é, então, baseado na "função transferência de modulação", *Modulation Transfer Function* (MTF). Utilizando um sinal de intensidade modulada harmonicamente, a interferência acústica na inteligibilidade é relacionada à redução da amplitude de modulação, avaliada para 14 bandas de frequência de modulação, em 7 bandas de oitava. Esses valores são arranjados, possibilitando a conversão em um valor único de STI. Uma simplificação desse método, o RASTI, é baseada em apenas nove bandas de frequência de modulação para 500 Hz e 2 KHz. Dado que a MTF pode ser obtida analiticamente a partir das características acústicas e geométricas da sala, o STI também pode ser calculado diretamente a partir dessas características (VIVEIROS, 1989). Testes de BRADLEY (1985) demonstraram que, para 100% de Inteligibilidade, o valor máximo de 0,6 para STI é apresentado. Foi demonstrado por SALA e VILJANEN (1995) que valores RASTI são diretamente dependentes não só da quantidade mas, também, da disposição de superfícies de absorção sonora pela sala. Apesar de ser amplamente utilizado, um estudo recentemente apresentado por ONAGA et al. (2001), afirma que o STI desconsidera as reflexões úteis para os níveis da fala, apresentando então um desacordo para avaliação da inteligibilidade da fala em salas.

O indicador da razão da energia sonora útil e energia sonora prejudicial, *useful-to-detrimental sound ratio* (U50), combina o valor da razão S/R com o valor da razão C50. Foi demonstrado por BRADLEY (1986b), que um valor U50 igual a +1,0 dB corresponde a 100% de inteligibilidade. Recentemente, uma nova abordagem teórica de HODGSON e NOSAL (2002), para avaliar mais precisamente a contribuição da reverberação salas, calcula o U50 em função do TR, da distância do orador ao ouvinte, do nível da voz na fonte, da distância entre a fonte de ruído e o ouvinte e do nível do ruído na fonte. Além disso, também considera os índices de direcionalidade da voz e da fonte de ruído e, também, o volume da sala, área de

superfícies internas e absorção pelo ar. Esse estudo coloca que, numa sala real, são os níveis na fonte da voz e na fonte do ruído que são constantes, e não o S/R, que é influenciado pela reverberação e pela distância dessas fontes sonoras em relação à posição do ouvinte. Isso deveria ser observado também para aprimorar os testes de inteligibilidade.

3.7 RECOMENDAÇÕES DE TR E NÍVEIS DE RUÍDO AMBIENTE EM SALAS DE AULA

Foi verificado por BRADLEY (1986a), que o S/R e o TR (1 kHz) são os indicadores mais simples para avaliar, com boa precisão, a inteligibilidade em uma sala de aula, pois envolvem apenas medições já bastante difundidas. BRADLEY (1986b) também comparou resultados em diferentes salas de aula e verificou que, para conseguir valores ótimos de inteligibilidade da fala com os indicadores $SI = 100\%$, $U50 = +1,0$ dB e $STI = 0,6$, são necessários os valores de S/R na faixa de 15 dB(A) a 20 dB(A) e TR de 0,7s a 0,9s. Esses valores são recomendados para adolescentes e jovens adultos sem problemas auditivos. Considerando ouvintes de todas as idades, são recomendados valores de TR entre 0,4s e 0,5s e um nível de ruído ambiente máximo igual a 30 dB(A). A Figura 7 mostra as curvas obtidas por análise de regressões múltiplas de valores de inteligibilidade da fala em função de S/R, para diferentes valores de TR. Verifica-se que é possível conseguir uma inteligibilidade satisfatória com valor S/R de +15 dB(A) mesmo para um valor de TR considerado alto.

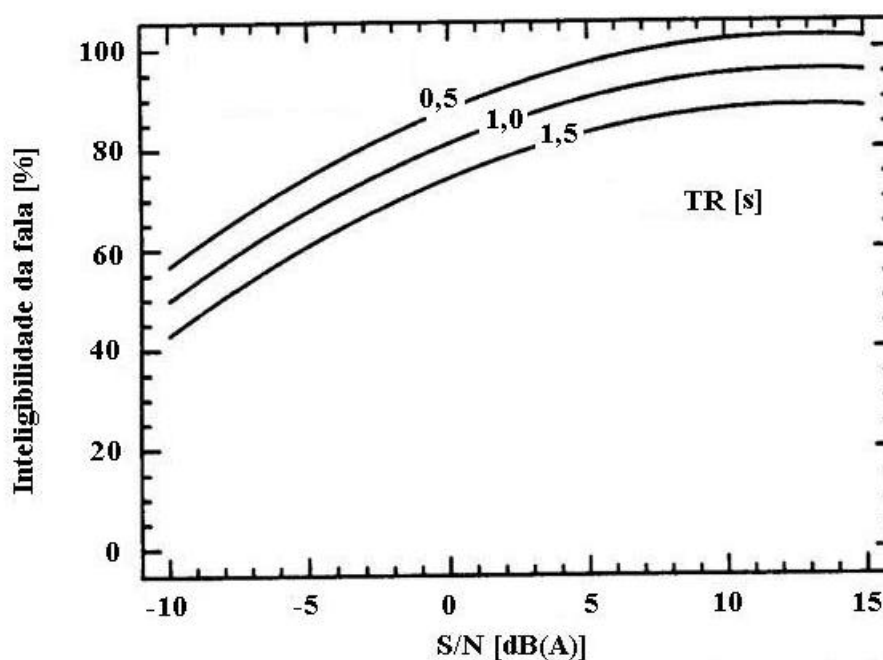


Figura 7 - Valores de inteligibilidade da fala em função de S/R para diferentes valores de TR (BRADLEY, 1986b).

Resultados mais recentes da avaliação de indicadores de inteligibilidade da fala em salas, demonstrou que valores de TR entre 0,5s e 0,4s são desejados para alcançar 100% de inteligibilidade em salas entre 100m³ e 500m³ (BISTAFA e BRADLEY, 2000). Esses valores devem ser uniformes para toda faixa de frequência importante para a fala, de 125 HZ a 4kHz. Através desses dados, chega-se a um valor ideal de 13 dB(A) de S/R, com máximo de 38 dB(A) de ruído ambiente, para 100% de inteligibilidade, com esforço vocal normal para um ouvinte, a um metro de distância, em frente ao orador.

3.7.1 Regulamentações e diretrizes para qualidade acústica em salas de aula

O texto da Organização Mundial da Saúde (OMS) (BERGLUND et al., 1995) diz que, para salas pequenas tais como salas de aula, a abordagem convencional de requerer níveis de ruído e TR adequados, é uma forma satisfatória de garantir a inteligibilidade. Algumas das regulamentações para acústica de salas de aula, utilizadas internacionalmente ou propostas por organizações estão apresentadas, de forma resumida, na Tabela 3 (BROOKS et al., 1998; MACKENZIE, 1998; Vallet, 2000; ABNT, 1999; BERGLUND e LINDVALL, 1995; ASHA, 1995).

Tabela 3 - Comparação de diferentes exigências acústicas para salas de aula (BROOKS et al., 1998; MACKENZIE, 1998; Vallet, 2000; ABNT, 1999; BERGLUND e LINDVALL, 1995; ASHA, 1995).

Ref.	País	Ruído ambiente [dB(A)]	TR [s]	Comentário
1.	Brasil (NBR 10152)	35 – 45	-	Bibliotecas
		40 – 45	-	Salas de aula e laboratórios
2.	Portugal (Lei 251/87)	35	1,0	(125 Hz - 250 Hz)
		35	0,6 - 0,8	(500 Hz - 4 kHz)
3.	Inglaterra (BB 87)	40	0,5 - 0,8	Aulas teóricas
		45	0,5 - 0,8	Aulas práticas
4.	Inglaterra (BS 8205)	40	0,5	Aulas teóricas <100 m ³
		45	1,0	Aulas práticas <1000m ³
5.	Alemanha (DIN 4109)	30	-	-
6.	EUA (ASHA)	30	0,4	S/R ≥ 15 dB(A)
7.	EUA (ASHRAE)	45	-	-
8.	EUA (ANSI)	35	0,6 - 0,7	S/R ≥ 15 dB(A)
9.	Suécia (BBR 94)	30 (Leq)	-	-
10.	Finlândia	35	0,6 - 0,9	-
11.	Turquia	45 (Leq)		-
12.	OMS	35	0,6	Inteligibilidade em salas de aula
-	Itália	36	0,5 - 2,0	Depende da frequência e m ³
-	França	38 (Leq)	0,4 - 0,8	Sala até 250 m ³
			0,6 - 1,2	Sala > 250 m ³
-	Bélgica	30 - 45 (Leq)	-	-

1. NBR10152/1987, Níveis de Ruído para Conforto Acústico, ABNT, 2000.
2. Regulamento Geral sobre o Ruído, Lei 251/87, 24 Junho 1987.
3. British Guidelines for Environmental Design in Schools, Building Bulletin 87, Dept. of Education and Employment - DfEE, U.K., 1997.
4. BS 8205:1985 British Standard - Learning Spaces where Audio-visual Equipment will be used.

5. German Performance - Design Standard, DIN 4109, 1989.
6. ASHA - Position Statement and Guidelines for Acoustics in Education Settings, 37(14), mar. /95.
7. Recomendações dos membros de ASHRAE TC 2.6 Sound and Vibration Committee.
8. Draft Standard by the American National Standards Institute & Acoustic Society of America - Accredited Standards Committee S-12, 2001.
9. Swedish Building Regulation BBR 94, 1995. As diretrizes suecas incluem controle para os níveis de ruído nas baixas frequências.
10. Acoustics Conditions for Speech Communication in Classrooms, E. Pekkarinen & V. Viljanen, Scand. Audiology, 20, pp. 257-263, 1991.
11. Regulamentação Turca para Controle de Ruídos, 1986.
12. Community noise, Archives of the Centre for Sensory Research, publicado pela Organização Mundial da Saúde (*WHO*), 1995.

3.8 URBANIZAÇÃO E QUALIDADE DE ENSINO

Para o bom aprendizado são aspectos fundamentais: o entendimento da palavra falada, ou seja, a inteligibilidade da fala, e o poder de concentração de alunos e professores. Baixos níveis de ruído dentro das salas de aula, são essenciais e prioritários para se atingir a qualidade de ensino. Em áreas urbanas, o ruído dos veículos nas vias de grande tráfego é um dos principais fatores de degradação acústica do ambiente. Todos os indicadores de inteligibilidade da fala em salas consideram para a avaliação um valor de ruído ambiente constante no tempo. Para poder avaliar a interferência do ruído de tráfego na inteligibilidade da fala em salas de aula é, então, necessário utilizar um indicador que represente um valor único representativo do ruído gerado por vias de tráfego. O indicador de ruído $Leq(A)$ é amplamente utilizado para essa finalidade. A seguir serão apresentados os problemas da relação do tráfego urbano versus atividades em salas de aula.

Em escolas próximas a vias, onde o ruído de tráfego é a fonte predominante e não há projeto acústico adequado para o edifício, os níveis de ruído ambiente dentro das salas de aula são altos e a inteligibilidade da fala é reduzida. Neste caso, é preciso aumentar a contribuição das reflexões para a voz e, ao mesmo tempo, diminuir o nível ruído ambiente da sala. Uma pesquisa com alunos, executada por SUTHERLAND e LUBMAN (2001), concluiu que há uma correlação entre uma boa acústica e a melhor performance escolar e que, da mesma forma, a inadequação do nível de ruído e da reverberação em salas de aula, está ligada à redução dessa performance. Um trabalho de VALLET (2000) apresentou que altos níveis de

ruído podem causar problemas para o aprendizado pois provocam: mascaramento da fala e diminuição de inteligibilidade do conteúdo do que é lecionado, diminuição da atenção e fadiga mental, aumento no tempo para o aprendizado da leitura, problemas de comportamento dos alunos (intranquilidade, agressividade e apatia) e fadiga vocal nos professores (alteração forçada no espectro de frequência da fala nas altas frequências e perda temporária a voz).

Resultados de medições em uma escola primária, na Eslovênia, evidenciaram que o ruído dentro das salas de aula, com a escola vazia, era maior nas salas voltadas para a via de tráfego (CARIC e CUDINA, 2001). Com as janelas abertas, todos valores Leq medidos internamente ficaram acima de 40 dB(A), chegando a mais de 60 dB(A). Em todas as salas o $L_{máx}$ medido foi acima dos 60 dB(A) e em duas delas alcançaram valores maiores de 80 dB(A). Com as janelas fechadas em apenas duas salas os valores $Leq(A)$ ficaram abaixo de 40 dB(A), não menos que 30 dB(A). Nenhum dos professores deixou de reclamar do ruído e 44% dos alunos consideravam que o ruído externo causava incômodo. Uma ampla pesquisa executada por CELIK e KARABIBER (2000) em escolas de Istambul, apresentou as seguintes conclusões: o menor valor medido de ruído externo foi de 55 dB(A), 66% das escolas estão localizadas em locais onde os níveis de ruído estão acima de 60 $Leq(A)$, 73% das salas de aula localizam-se nas fachadas mais ruidosas, principalmente pelo ruído de tráfego e em 83% dessas salas os níveis valores Leq internos medidos estão acima de 40 dB(A). Em outro estudo, feito por AVSARM e GONULLU (2000), em escolas primárias e de segundo grau na Turquia, medições do ruído externo próximo às escolas apresentaram valores Leq acima de 60 dB(A) em 53% destas. Nas escolas mais ruidosas, com valor Leq externo entre 65 dB(A) e 77 dB(A), os valores Leq internos apresentaram-se acima de 50 dB(A) para janelas fechadas e acima de 60 dB(A) para janelas abertas, chegando até a 70 dB(A). O ruído externo na fachada de escolas inglesas apresentou 31% dos valores Leq acima de 60 dB(A) chegando a 72 dB(A) (SHIELD et al., 2000). Esse trabalho também mostrou que para as seis escolas investigadas, o maior nível de ruído interno nas salas de aula ocorre exatamente na escola com o maior nível de ruído externo, e vice-versa.

Em quarenta e duas escolas municipais do Rio de Janeiro, pesquisadas por SANTOS e SLAMA (1993), 50% dos professores de colégios para crianças em nível de alfabetização e de primeiro grau, afirmaram que o nível de ruído interfere no rendimento dos alunos em sala de aula. Algumas escolas próximas a vias de grande movimento, sujeitas a engarrafamentos, estavam expostas a um nível de ruído externo de até 94 dB(A), nos horários de maior tráfego. Em um trabalho de avaliação acústica de prédios escolares da rede pública da cidade de

Campinas, BERTOLI (2001) mediu os níveis de pressão sonora, dentro e fora das edificações. Ao estudar duas salas de aula em uma mesma escola, verificou-se que, dentro das salas com janelas voltadas para ruas ruidosas, os níveis de ruído eram mais elevados. Em medições de PEDRAZZI et al. (2001), efetuadas em cinco salas de aula do bloco de engenharia do Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná (CEFET-PR), os valores Leq internos, medidos em vários pontos da sala de aula, variaram entre 45 dB(A) e 54 dB(A) para janelas abertas e entre 35 dB(A) e 42 dB(A) para janelas fechadas. Nessas condições, 83% dos alunos usuários atestaram que percebem o ruído externo e 55% disseram que acham o ruído muito intenso.

3.8.1 Via de tráfego versus inteligibilidade

A Tabela 4 apresenta os resultados de um estudo sobre as condições do ruído de tráfego de vias próximas escolas em Istambul (KURRA, 2000). Pode-se observar que há uma correlação entre o fluxo de veículos e os valores Leq(A), dentro das salas de aula. Com o aumento dos valores Leq(A), o nível de inteligibilidade diminui e a porcentagem de professores incomodados aumenta. A escola A, apesar de não apresentar o maior fluxo, tem a maior porcentagem de veículos pesados e, conseqüentemente, 100% de professores incomodados. Apesar da ausência do dado é de se esperar que, nesse caso, o teste de inteligibilidade também apresentasse o pior valor.

Tabela 4 - Resultados de um estudo sobre as condições do ruído de tráfego de vias próximas a três escolas de segundo grau em Istambul (KURRA, 2000).

Escola	A	B	C
Porte da via	Seis pistas	Três pistas	Seis pistas
Fluxo [veículos/hora]	4210	1740	6352
Veículos pesados [%]	10,7%	3,8%	5,3%
Leq na fachada do edifício	76 dB(A)	74 dB(A)	79 dB(A)
Leq dentro da sala com janelas fechadas	55 dB(A)	56 dB(A)	58 dB(A)
Teste de inteligibilidade	-	61,3%	53,3%
Professores incomodados pelo ruído de tráfego	100%	75%	88%

3.9 CONCLUSÕES

Um nível de ruído ambiente acima do adequado em uma sala de aula, prejudica profundamente a performance das atividades escolares, visto que a inteligibilidade da fala é fator fundamental para o bom aprendizado. Todas as regulamentações existentes para acústica em escolas limitam os níveis de ruído ambiente dentro das salas de aula. O ruído de tráfego é a fonte de ruído mais presente nas cidades e o padrão de construção e planejamento de edificações escolares, principalmente no Brasil, não é eficiente para proporcionar salas de aulas protegidas dessa fonte de ruído. Limitações de níveis de ruído devem ser aplicadas coibindo a coexistência de edifícios escolares sem planejamento acústico e vias de tráfego ruidosas, tanto para implantação de projetos novos quanto para situações já consolidadas. No próximo Capítulo será caracterizada a situação de estudo e identificado o comportamento da via de tráfego através dos indicadores de ruído estudados. Os resultados darão subsídios para uma correta estimativa dos efeitos do ruído de tráfego no local, para posterior avaliação da influência do ruído de tráfego nas salas de aula do edifício estudado.

4 CAPÍTULO - ESTUDO DE CASO: CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

Esse Capítulo apresenta a investigação do ruído de tráfego gerado pela via principal na área em estudo. A situação atual do estudo de caso é apresentada detalhadamente. Medições são realizadas, ao longo da via, para levantamento dos indicadores de ruído, $Leq(A)$, $L10$, $L90$ e $L_{máx}$. Através da análise dos resultados, foi caracterizado o comportamento do ruído de tráfego, gerado pela via atual. Essas informações darão subsídios para posterior análise do impacto do ruído na área, considerando a ampliação planejada para a via, que modificará as atuais características de tráfego e, também, o novo edifício do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, projetado para substituir a atual edificação.

4.1 A SITUAÇÃO ATUAL DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo situa-se dentro do campus da Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, como mostra a Figura 8, no bairro do Pantanal, em Florianópolis. A região apresenta grande concentração populacional e ocupação mista, constituída por residências, comércio de serviços e, também, pelos edifícios institucionais, que compõem o campus universitário. A situação de estudo configura-se pelo terreno, onde se localiza o edifício do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, situado junto ao entroncamento de duas vias de tráfego de automóveis, uma via principal de passagem e uma secundária que serve ao campus.



Figura 8 - Localização da área de estudo dentro do campus universitário.

A situação ampliada da área é apresentada na foto aérea da Figura 9, onde é mostrado o edifício provisório do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, ao centro, bem como as vias, principal e secundária, que margeiam os limites do terreno. Atualmente, o Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC é composto de cerca de quatrocentos alunos, quarenta e cinco professores e onze servidores (funcionários). O edifício conta com onze salas de aula, incluindo ateliês, mais uma biblioteca, oito laboratórios de pesquisa e uma oficina de maquetes. O edifício é todo construído em madeira, inclusive estruturas, paredes internas e externas, bem como portas e esquadrias, com vidros simples, sem sistema de vedação especial. A edificação tem caráter provisório e não apresenta nenhum tipo de preocupação com a qualidade acústica de seus espaços internos, principalmente em relação ao isolamento aos ruídos externos e entre salas adjacentes. Alguns edifícios de outros departamentos e estacionamentos circundam a edificação, assim como algumas edificações residenciais e comerciais, localizadas na margem oposta da via. O terreno apresenta-se ligeiramente abaixo do nível da cota da via de estudo, com cerca de 6% de inclinação. Entre a via e o edifício escolar há uma grande área gramada com algumas poucas árvores e pequenas pedras.



Figura 9 - Foto aérea da situação atual na área de estudo, via principal acima, via secundária à esquerda e edifício escolar ao centro e abaixo (IPUF, 2001).

A via principal, Rua Deputado Antônio Edu Vieira, corta a margem leste do campus da UFSC, servindo, além dos usuários da universidade, à população do bairro do Pantanal. Essa via faz ligação com uma via rápida de grande importância, a Av. Prof. Henrique da Silva Fontes, que faz parte da Av. Beira-mar Norte que corta os bairros centrais da ilha até o centro da cidade e às pontes que fazem a única ligação rodoviária com o continente. A via asfaltada possui cerca de 8 metros de largura, uma pista para cada sentido de tráfego e passeio de pedestres em concreto com cerca de 1,50 metro de largura, em cada margem da via, por toda sua extensão. Na margem oposta ao campus, as edificações mais antigas possuem fachadas ou muros bem próximos a calçada, enquanto as mais novas apresentam maior afastamento da via.

Uma via secundária, interna ao campus, faz a ligação entre a via principal, Rua Deputado Antonio Edu Vieira, e os estacionamentos dos diferentes departamentos, passando no limite norte do terreno estudado. Por ser utilizada apenas por usuários do campus, ela não se configura como uma via de passagem e, por esse motivo, o fluxo de veículos é bastante limitado e a velocidade tráfego é baixa. Os horários em que a via é mais utilizada são quando os usuários do campus estão saindo ou chegando para as atividades, justamente fora dos horários de aula. Devido a essas características, é possível dizer que mudanças no tráfego da via principal não afetarão diretamente as características da via de tráfego interna ao

campus. Sem mudanças no fluxo de tráfego, da composição dos veículos ou da velocidade média, é possível afirmar que não haverá mudanças significativas do ruído gerado por essa via e, portanto, a contribuição para o estudo de impacto de ruído desenvolvido será nula.

4.2 MEDIÇÕES DE RUÍDO AMBIENTAL

Medições para avaliação do ruído ambiental são executadas para investigação de reclamações, estimativa do número de pessoas expostas, cumprimento de regulamentos e leis, planejamento de uso do solo, investigação de impacto ambiental, avaliação da eficiência de medidas corretivas, calibração de modelos matemáticos, monitoramento do comportamento, validação de previsões para situações futuras, além de investigações em pesquisas. Para uma correta avaliação do ruído, é importante o bom conhecimento das características das fontes sonoras avaliadas e de como o som se propaga a partir destas. Deve-se considerar a direcionalidade das fontes, a flutuação no tempo e seu espectro em frequência. O ruído urbano mais comum é produzido por fontes múltiplas que, na maioria dos casos, estão em movimento, a saber: ruído de veículo em trânsito, aviões, trens, ruído industrial e ruído de atividades de lazer externas. As características de fontes individuais, assim como quando combinadas, devem ser consideradas. Na prática, para avaliar corretamente o ruído de uma fonte em movimento, é necessário realizar medições durante toda a passagem da fonte, para considerar sua variação sonora, direcional e temporal. Para cada objetivo diferente, os equipamentos, a área de estudo, o local de medição, o conhecimento da fonte de interesse, os procedimentos de amostragem e o critério medição, devem ser bem estudados para estarem de acordo com os resultados almejados. Considerando normas nacionais e internacionais relativas a ruído urbano apresenta-se os erros inerentes à medição de ruído de tráfego.

4.3 ESTIMATIVA DOS ERROS EM MEDIÇÕES DE RUÍDO DE TRÁFEGO

O ruído de tráfego se caracteriza por ser bastante flutuante no tempo e, também, por apresentar variações para diferentes períodos do dia. Na prática, as medições somente fazem a amostragem de uma parte da exposição, logo, o critério de amostragem apresenta certa incerteza na estimativa da exposição total do ruído. A precisão das medições e os detalhes dos procedimentos de medição devem estar de acordo com o tipo de ruído e com outros detalhes da exposição ao ruído. Os erros associados ao ruído de tráfego podem ser bastante diferentes

dos associados a outros ruídos, que apresentem diferentes comportamentos em relação à sua variação temporal. Trabalhos realizados por Vaskor et al. (1979) apud BERGLUND et al. (1985), mostraram que pode ser esperado, por exemplo, um erro médio de 2 a 3 dB(A) para o Leq, no período diurno. Segundo Bradley et al. (1979) apud BERGLUND et al. (1985), esses erros estão relacionados à distribuição estatística da pressão sonora no tempo. Resumidamente, a precisão dos resultados de uma medição depende da precisão dos procedimentos de medição, isto é, da quantidade de amostras levantadas e da técnica de amostragem, da classe de precisão da instrumentação e das condições de medição, isto é, situações climáticas, geográficas e urbanas.

4.3.1 Análise estatística do nível sonoro de vias de tráfego

O procedimento a seguir consta no Anexo D da ISO 8391 (FINKE, 1992) e é recomendado para obtenção do intervalo de confiança de 90% para a média de um grupo de amostras do nível sonoro de uma via de tráfego, através do desvio padrão das amostras e em função do número total, n , de amostras. A média aritmética do nível sonoro \bar{L} , definida como a medida da tendência central de um lote de amostragem, é obtida por:

$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{n} \quad (9)$$

onde L_i é o nível sonoro da i -ésima amostra medida e n é o número total de amostras.

Para obter-se uma indicação da dispersão, ou seja, de quanto os dados individuais de uma população desviam-se da média, é feito o cálculo da variância e do desvio padrão. O desvio padrão, s , definido pela raiz quadrada da variância, é igual a:

$$s = \left[\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Existem erros na estimativa da média e devemos, então, estimar um intervalo de confiança para a média. O intervalo de confiança é um conjunto de valores, dentro do qual a média se situa, sendo que não se pode afirmar exatamente qual é esse valor, ou seja, todos têm exatamente a mesma probabilidade de ocorrência. O valor absoluto para 90% de intervalo de

confiança, d , pode ser obtido pela razão de d/s em função de n , listado na Tabela 5. Nesta tabela estão, também, listados os valores máximos de s para n amostras, para erros máximos de ± 1 dB ou ± 3 dB (FINKE, 1992).

Tabela 5 - Tabela para estimativa do intervalo de confiança, d , para a média dos dados de um grupo de poucas amostras, em função do número de amostras, n , e do desvio padrão, s (FINKE, 1992).

Número de amostras n	$\frac{d}{s}$	Máximo s para $d = \pm 1$ dB	Máximo s Para $d = \pm 3$ dB
3	2,065	0,48	1,45
4	1,359	0,74	2,21
5	1,066	0,94	2,81
6	0,901	1,11	3,33
7	0,793	1,26	3,78
8	0,716	1,40	4,19
9	0,658	1,52	4,56
10	0,611	1,64	4,91
11	0,573	1,74	5,24
12	0,542	1,85	5,54
20	0,397	2,52	7,56
30	0,315	3,17	9,52

4.3.2 Classe de erro de instrumentos de medição

Um medidor de nível de pressão sonora é um dispositivo eletrônico o qual, através de um microfone, mede a amplitude de oscilação da pressão sonora no ar. O componente mais crítico de um medidor de nível de pressão sonora é o microfone, que é o dispositivo que capta a oscilação temporal da pressão sonora no ponto de medição e a converte em sinal de voltagem. Como a sensibilidade e precisão variam para cada tipo de microfone, dependendo do objetivo de medição, é preciso saber quais são as especificações corretas para os limites do espectro e dos níveis de pressão sonora. Segundo as normas IEC 60651 e IEC 60804 (apud FINKE, 1992), a tolerância de erro máximo para diversas características dos medidores é classificada em quatro tipos, resumidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Classe de precisão de medidores de NPS e respectivas margens de erro (IEC 60651 e IEC 60804 apud FINKE, 1992).

Classe	Tipo 0	Tipo 1	Tipo 2	Tipo 3
Variação em dB	±0,4	±0,7	±1,0	±1,5

A norma para descrição e medição de ruído ambiental, ISO 1996/1 (apud IOA, 1996), indica que para medição de ruído de vias de tráfego o medidor deve ser no mínimo do tipo 2, e o aparelho deve ser ajustado para leitura em dB(A). A resposta lenta deve ser utilizada para medição de ruído estável e a resposta rápida para medições de ruídos flutuantes, onde é necessária integração estatística. A norma brasileira NBR 10151 (ABNT, 1998) exige que todo o sistema de medição, inclusive o medidor de nível de pressão sonora, deve atender às especificações da norma IEC 60651 para tipo 0, tipo 1 ou tipo 2 e recomenda que o equipamento possua recursos para medição de nível de pressão sonora equivalente ponderado em “A”, Leq(A), conforme IEC 60804. Apesar dos contínuos esforços em refinar as especificações de tolerância de instrumentos, estudos de PEPPIN et al. (1996), concluem que as modificações de especificações contidas em normas são inúteis quando examinadas à luz da imprevisibilidade de uma situação real. Foi demonstrado que, para medições em situações não controladas, a resposta de frequência de um microfone é imprevisível. Os resultados mostraram que um pequeno deslocamento do microfone já é capaz de gerar erro no valor medido, podendo ocorrer uma diferença de 2 dB, nas médias e altas frequências, entre os valores medidos por diferentes tipos de microfones, e que, mesmo para medição em dB(A), os resultados podem variar.

A verificação, e eventual ajuste do medidor de nível de pressão sonora, ou do sistema de medição, deve ser realizada com calibrador acústico imediatamente antes e após cada medição ou conjunto de medições relativas ao mesmo evento. A norma ISO 1994 (apud BERGLUND et al., 1985) recomenda que o medidor de NPS deve ser calibrado utilizando uma pequena fonte sonora, com frequência e pressão sonora conhecidas, colocada bem próxima ao microfone. Além disso devem ser feitas calibrações periódicas de todos os componentes do aparelho. A norma brasileira, NBR 10151 (ABNT, 1998), prescreve que o calibrador acústico atenda às especificações da norma IEC 60942. Além disso, 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, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), renovado no mínimo a cada dois anos.

4.3.3 Erros gerados pela ação dos efeitos meteorológicos

Deve-se levar em conta que, ao percorrer distâncias maiores em áreas externas, cerca de 100m ou mais, a propagação das ondas sonoras será significativamente afetada pela variação das condições atmosféricas, resultando em erros nas medições. O texto da Organização Mundial da Saúde, OMS, reúne trabalhos que ilustram conceitos sobre a influência desses efeitos meteorológicos (BERGLUND et al., 1985). Sabe-se que os gradientes de temperatura e vento podem causar uma curvatura na propagação das ondas sonoras, tanto em direção a atmosfera como em direção ao solo, criando áreas de maior e menor nível de pressão sonora, em pontos distantes da fonte. Em alguns casos, turbulências atmosféricas podem “embaralhar” as ondas sonoras, reduzindo os efeitos de interferência, resultante da combinação de reflexões em diferentes direções. Também, a absorção das frequências mais altas é bastante dependente da temperatura e da umidade relativa do ar. Por causa desses efeitos complexos, não é possível prever precisamente a influência dos efeitos atmosféricos na propagação do ruído a grandes distâncias da fonte, mesmo em condições meteorológicas aparentemente estáveis.

A norma ISO 1996/1 (apud IOA, 1996), indica que as medições só devem ser efetuadas sob condições meteorológicas cuidadosamente especificadas, que resultem em uma propagação mais estável. A norma inglesa, CoRTN, recomenda que, para medição de ruído de tráfego, a superfície da via deve estar seca e, também, que a direção do vento deve ser preponderante na direção do ponto de medição para a via, ou seja, a componente na direção paralela à via deve ser menor que a componente perpendicular à mesma. A velocidade do vento na direção da via para o ponto de medição deve ser menor que 2 m/s na altura do medidor, no ponto médio entre o medidor e a via, e não deve ser maior que 10 m/s no microfone, em qualquer direção. Uma espuma barra vento pode ser usada para proteger o microfone, porém as medições não devem ser executadas quando a diferença entre o nível de ruído do vento e o nível de ruído a ser medido for menor que 10 dB(A) (IOA, 1996). Consta na norma brasileira NBR 10151 (ABNT, 1998) que se deve prevenir o efeito de ventos sobre o microfone com o uso de um protetor, conforme instruções do fabricante, e que não devem ser efetuadas medições na existência de interferências audíveis advindas de fenômenos da natureza.

4.4 ESTIMATIVA DE CORREÇÕES DOS VALORES MEDIDOS

Para a estimativa das correções a serem aplicadas aos resultados de uma medição de ruído de tráfego devem ser considerados: a duração de cada uma das medições, o intervalo entre as amostras levantadas e a localização do ponto de medição.

Medições de curta duração de $Leq(A)$, $L10(A)$ e $L90(A)$, em comparação com resultados do monitoramento de níveis de ruído por longo período, mostraram que uma amostragem por um tempo pequeno já é suficiente para caracterizar o ruído ambiente externo ou interno (SHIELD et al., 2000). A Figura 10 mostra resultados de uma investigação das diferenças apresentadas, em função do tempo de medição, para Leq , $L10$ e $L90$ e outros indicadores, em relação ao ruído de tráfego (FINKE, 1992). No gráfico apresentado são apresentadas as curvas com valores da diferença entre o resultado de medições de curta duração e uma medição contínua de uma hora. Os diagramas apresentam resultados para período diurno, caracterizado por apresentar um volume de tráfego maior, e para o período noturno, caracterizado por apresentar um volume de tráfego menor.

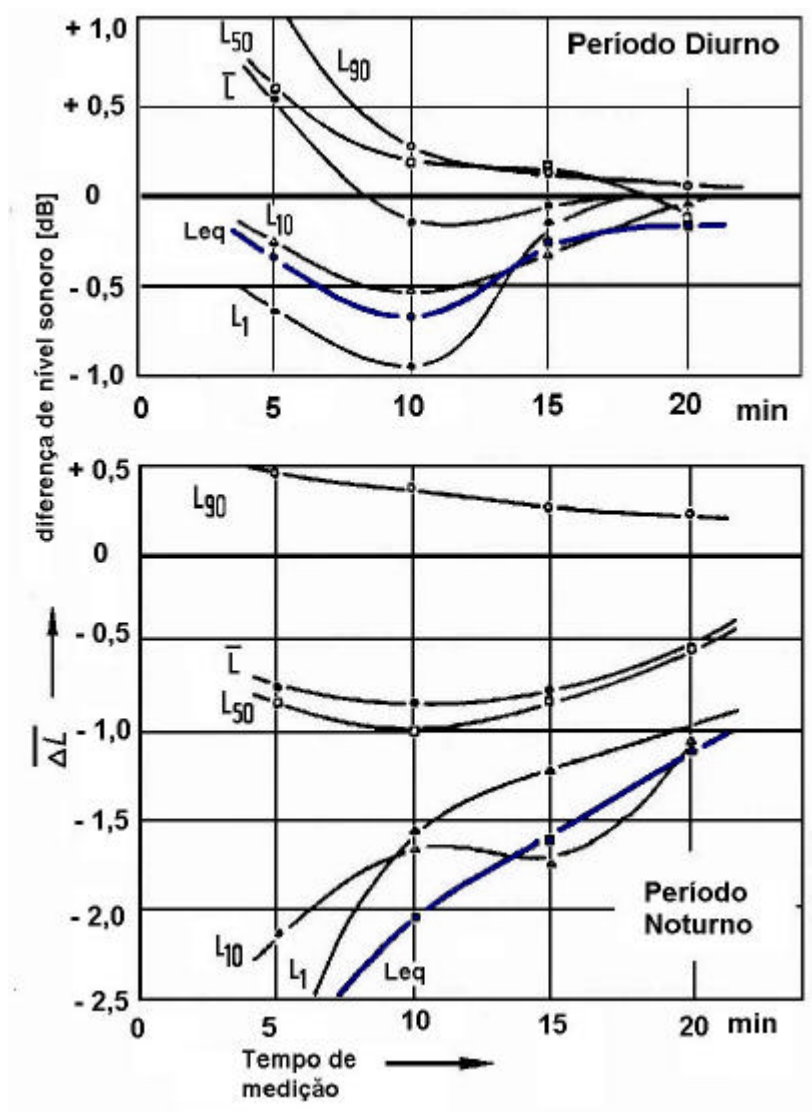


Figura 10 - Diferença esperada para os níveis de ruído, em função do tempo total de amostragem, para diferentes indicadores (FINKE, 1992).

Quando o aparelho não faz amostragem automática dos dados, a amostragem feita pelo operador será mais lenta. A Figura 11 mostra, para diferentes indicadores de ruído, a diferença esperada para os valores medidos em função do intervalo de amostragem, em relação a uma amostragem contínua do ruído. Os diagramas apresentam os valores para o período diurno e noturno. Pode-se observar que, segundo esse diagrama, a amostragem a cada 10 segundos, recomendada pela norma brasileira NBR 10151 para medição de ruído ambiental, resultará em um valor cerca de -2 dB menor que o real.

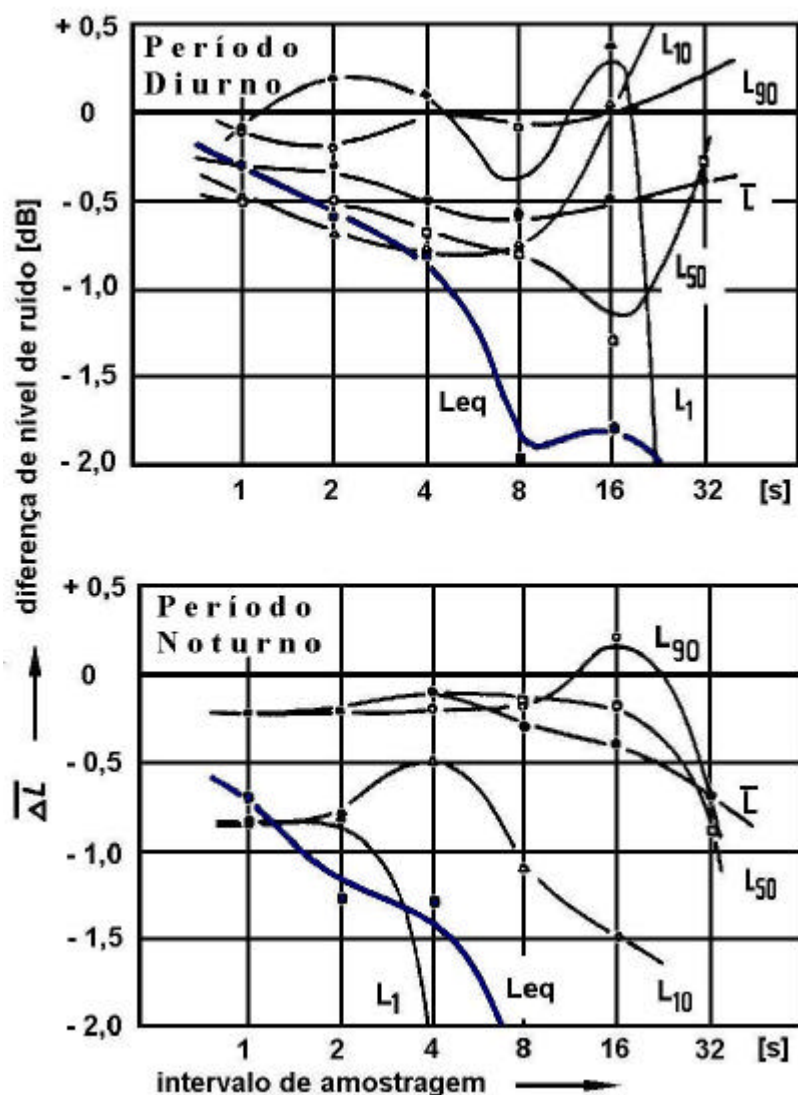


Figura 11 - Diferença esperada para os níveis de ruído em função do intervalo de amostragem para diferentes indicadores (FINKE, 1992).

A norma CoRTN (IOA, 1996) recomenda que o tempo de duração mínimo, T_{min} , para medição de ruído de uma via de tráfego, seja calculado por:

$$T_{min} = \left(\frac{4000}{q} + \frac{120}{r} \right) \text{ minutos} \quad (11)$$

onde q é o fluxo de veículos (mínimo de 100 veículos/hora) e r é o tempo de integração do instrumento (rápida, lenta ou impulsiva). O valor de T_{min} deve ser de, no mínimo, 5 minutos. Para um fluxo de veículos menor que 100 veículos/hora, normalmente para o período noturno, o valor de T_{min} deverá ser de, pelo menos, uma amostra por segundo durante uma hora.

As medições devem ser realizadas em locais com ampla visibilidade da fonte sonora, de forma que o caminho de propagação das ondas sonoras incidentes no microfone não seja obstruído por barreiras, objetos ou estruturas refletoras ou absorvedoras. Ao mesmo tempo, devem ser observados os efeitos das reflexões de fachadas no ponto de medição, para representar o NPS real do som incidente. Ao locar o microfone em um ponto, devem ser feitas considerações para que os resultados das medições sejam interpretados adequadamente. O microfone colocado a alguns metros da fachada captará apenas o NPS incidente. Com microfone posicionado contra a superfície externa de uma fachada, o NPS será 6 dB maior que ruído incidente real, devido ao efeito de duplicação da pressão sonora no ponto do microfone. Isso ocorre pois a onda sonora incidente e a onda sonora refletida chegam ao microfone simultaneamente. Quando o microfone externo é locado a 2m da fachada, não há duplicação exata da pressão sonora, mas sim uma duplicação aproximada da energia sonora correspondente a um aumento de 3 dB. Para a correta caracterização do ruído emitido por uma via de tráfego, além dos efeitos de superfícies próximas, é preciso evitar efeitos indesejados que condições de piso possam criar, assim como os efeitos causados pela proximidade de objetos, cruzamentos, semáforos, redutores de velocidade, pontos de ônibus, edificações, estacionamentos, praças, etc.

A norma internacional ISO 1994 recomenda uma correção de -3 dB para medições à distância de 2 m da fachada e de -6 dB para medições junto à superfície da fachada (BERGLUND et al., 1985). A norma ISO 1996/1 (apud IOA, 1996) indica que, quando for desejável minimizar a influência de reflexões, deve-se locar o ponto de medição a no, mínimo, 3,5 metros de qualquer superfície refletora e entre 1,2 metros e 1,5 metros do chão. Para avaliação de ruído em edifícios, é recomendado de 1 metro a 2 metros de distância da fachada de interesse. A norma brasileira NBR 10151 (ABNT, 1998) exige que no exterior da edificação as medições sejam efetuadas em pontos a 1,2 metro do piso e 2 metros do limite da propriedade ou quaisquer superfícies refletoras como muros, paredes, etc. A norma CoRTN recomenda que o diafragma do microfone deve ser mantido na horizontal e que o microfone se localize entre 4 e 15 metros de distância da via, a 1,2 metro de altura do piso e a mais de 15 metros de distância superfícies (IOA, 1996).

4.5 MEDIÇÕES DOS INDICADORES DE RUÍDO

O trabalho experimental organizou-se com a elaboração de um relatório padrão e com a definição dos procedimentos a serem executados antes de cada medição. A norma ISO 1996/1 (apud IOA 1996) indica que para cada medição executada devem ser reportadas as seguintes informações:

- a) Dados qualitativos: identificação e localização da fonte, natureza e estado do piso, natureza da fonte, caráter do ruído, variabilidade de emissão das fontes de ruído.
- b) Técnica de medição utilizada: tipo de instrumentação, procedimento de medição, cálculos; período de medição, detalhes de amostragem, posição das medições.
- c) Condições atmosféricas: velocidade e direção do vento, temperatura, pressão atmosférica, umidade relativa;

A norma brasileira NBR 10151 (ABNT, 1998), exige que no relatório de medições devem constar no mínimo as seguintes informações:

- a) Tipo ou classe, marca e número de série de todos os equipamentos de medição utilizados;
- b) Data e número do último certificado de calibração de cada equipamento de medição;
- c) Desenho esquemático e/ou descrição detalhada dos pontos da medição;
- d) Horário e duração das medições do ruído;
- e) Nível corrigido de pressão sonora, indicando as correções aplicadas;
- f) Nível de ruído ambiente;
- g) Valor do nível critério de avaliação de ruído aplicado para a área e o horário da medição;
- h) Referência à norma.

O relatório criado está apresentado na Figura 12. Para cada uma das medições foram preenchidos os seguintes dados:

- a) Data, hora e tempo de duração da medição, condições de tráfego, tipo e condições do piso; número total de veículos contados durante as medições e discriminação dos veículos em pesados, leves e motocicletas;

- b) Instrumentação: marca e modelo do medidor, classe de precisão, método e data de calibração, tipo de microfone utilizado, circuitos de compensação e tipo de resposta;
- c) Condições meteorológicas: velocidade do vento, temperatura e umidade relativa;
- d) Níveis de pressão sonora em dB(A) medidos num intervalo de amostragem e período estabelecido;

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO DE CAMPO				N ^o :
Local:	Período:	Hora:	Data:	
Condições de tráfego:				
Condições do piso:	Observações: carros-	motos-	cam/ônib-	total-
INSTRUMENTAÇÃO				
Marca e modelo:	Classe de precisão:			
Curva:	Calibração:	Data:	Dist. de barreiras (m):	Baterias (V):
Resposta:	Microfone:		Altura do tripé (m):	Dist. da via (m):
Observações:				
CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS				
Direção do vento:	Veloc. do vento (m/s):	Temperatura (°C):	Umidade Relativa (%):	
Observações:				
DADOS				
Valores medidos a cada ____ segundos durante o período				
				Leq:
				Lmax:
				L10:
				L90:

Figura 12 - Modelo do relatório de medição desenvolvido para o estudo.

Foi desenvolvido um procedimento para as medições executadas. Antes de cada medição foram seguidas as seguintes operações:

- a) Verificação da voltagem das baterias;

- b) Calibração do microfone;
- c) Programação e posicionamento do sensor eletrônico de temperatura e umidade relativa;
- d) Verificação da distância entre o local de medição e barreiras próximas;
- e) Instalação do medidor em tripé a 1,5 metro de altura;
- f) Proteção do microfone com espuma barra vento;
- g) Ajuste das funções do medidor: tempo de resposta rápida, curva dB(A);
- h) Verificação da velocidade do vento;
- i) Início das medições e eventual contagem simultânea dos veículos.

Foram realizadas vinte medições ao longo da via, Rua Deputado Antonio Edu Vieira, no período de funcionamento usual das atividades do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, de segunda à sexta, entre 6:00 e 19:00 horas. Os níveis de ruído em dB(A) foram levantados por amostragem, em intervalos de cinco segundos durante um período de seis minutos. Foi utilizado o medidor de nível de pressão sonora Tipo 1 DSP80, da Larson-Davis Laboratories. Nenhuma medição foi realizada para velocidade do vento acima de 2m/s. As temperaturas registradas nas medições variaram entre 20,6°C e 25,5°C, com amplitude menor que 0,4°C para uma mesma medição. As porcentagens registradas para umidade relativa nas medições ficaram entre 67,1 % e 96,6 % e não variaram mais que 2,4 % para uma mesma medição. Todas as medições foram efetuadas em dias com condições meteorológicas estáveis, sem chuvas, ventos em excesso, condições climáticas extremas ou eventos raros. As medições foram feitas em cinco pontos ao longo da via no trecho de interesse, indicados de 1 a 5 na Figura 13. O medidor foi localizado a cerca de 10 metros de distância da margem da via. Foi mantida a distância mínima de 3,5 m de fachadas ou barreiras, mantendo-se o operador afastado do microfone.

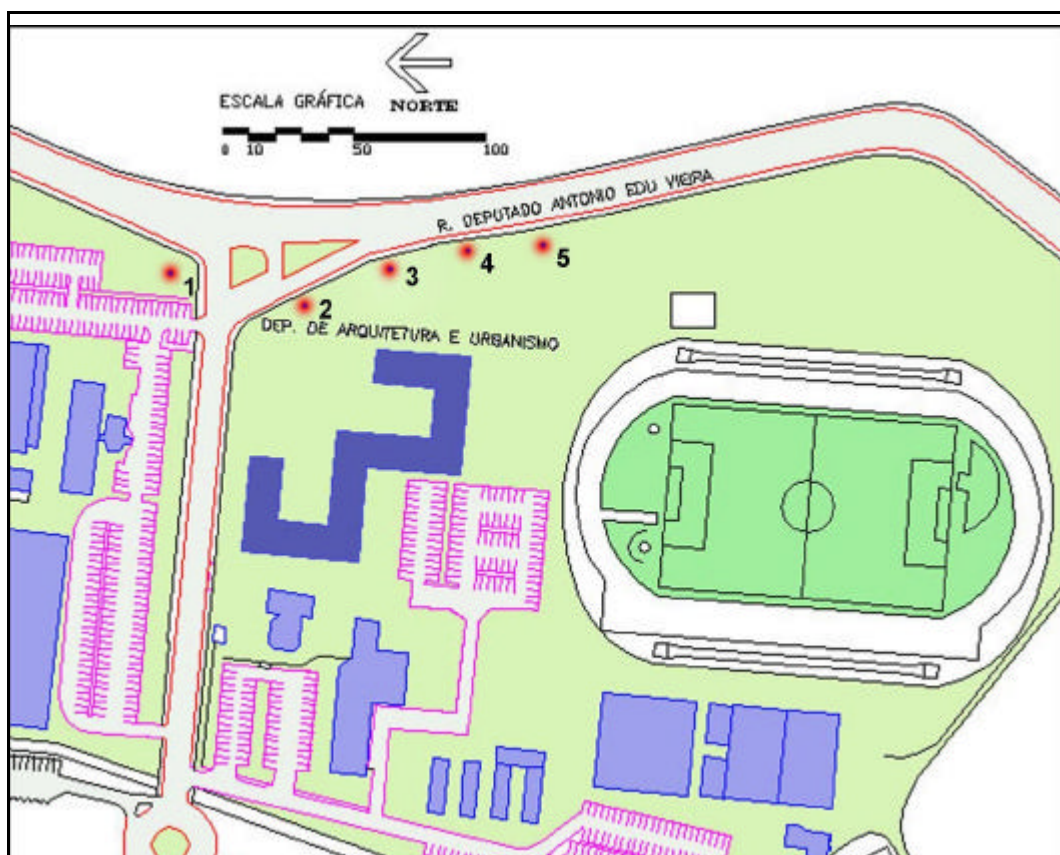


Figura 13 - Planta digitalizada da área com os pontos de medição indicados de 1 a 5.

A partir do levantamento dos valores de $L_{eq}(A)$ e $L_{máx}(A)$, medidos automaticamente pelo aparelho, e dos valores de L_{10} e L_{90} , estimados a partir da distribuição estatística dos níveis $dB(A)$ medidos, foi possível caracterizar o ruído gerado pela via de estudo. Os valores obtidos são utilizados, posteriormente, para a investigação de impacto de ruído, decorrente de modificações das características do tráfego da via.

4.5.1 Estimativa dos valores L_{10} e L_{90}

A partir das medições, foram construídos gráficos da frequência de ocorrência acumulada dos níveis de ruído medidos, convertidos em porcentagem do número total de eventos, para uma escala de nível de ruído em $dB(A)$. Os gráficos da

Figura 14, Figura 15, Figura 16, Figura 17 e Figura 18 apresentam os resultados para cada ponto de medição em diferentes dias da semana. Desses gráficos foram extraídos os indicadores L_{10} e L_{90} , indicados pelas linhas escuras no gráfico. A esses valores foram, posteriormente, aplicadas as correções apresentadas no item 4.4. A partir desses gráficos, pode-se observar que há uma dispersão maior para os valores de L_{90} , o que demonstra uma

flutuação maior no nível de ruído de fundo para a área. Uma análise mais detalhada dos resultados, com apresentação de gráficos específicos, é feita mais adiante.

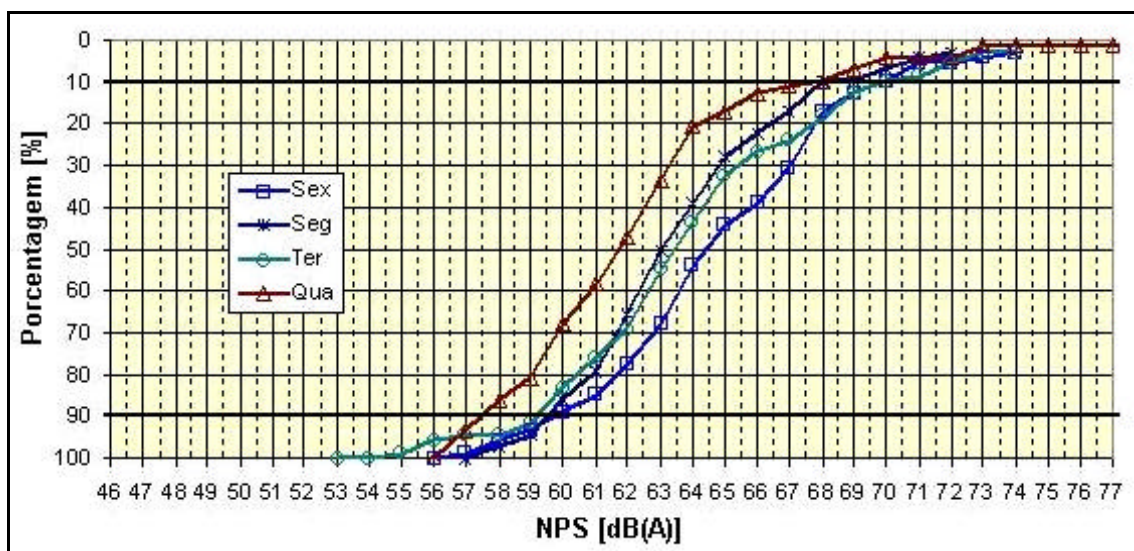


Figura 14 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 1.

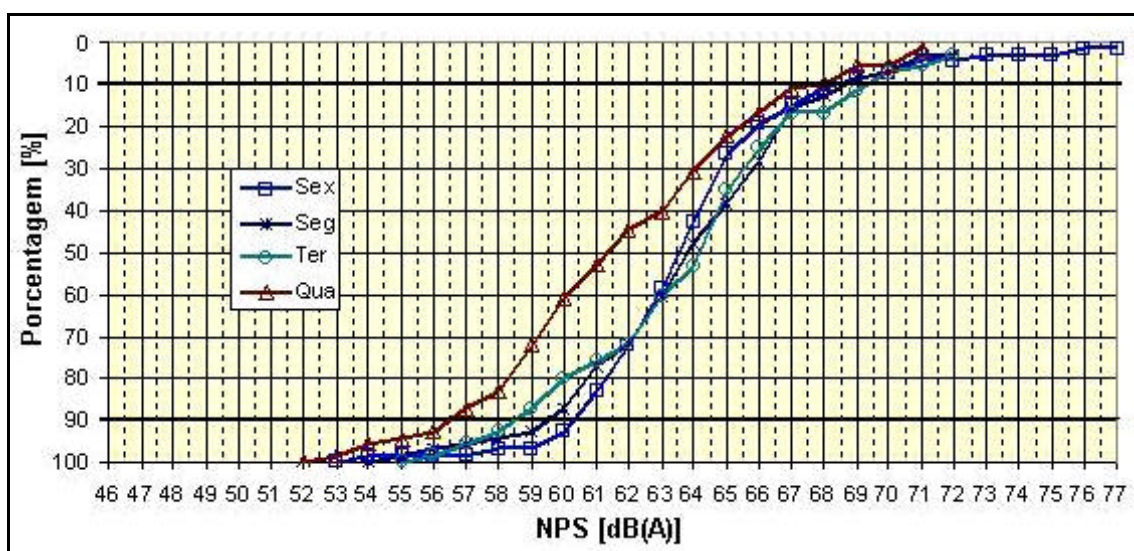


Figura 15 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 2.

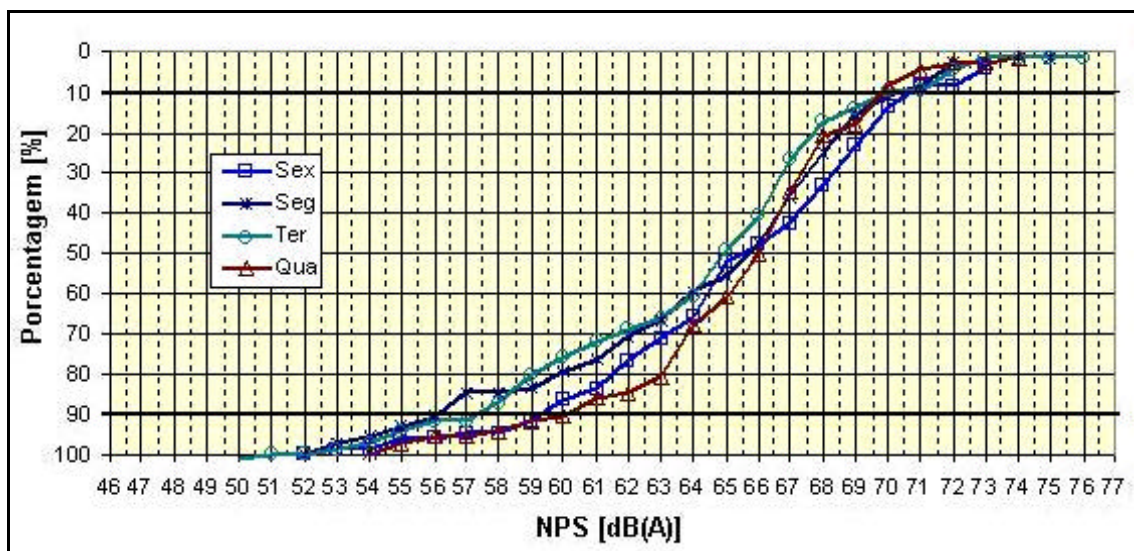


Figura 16 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 3.

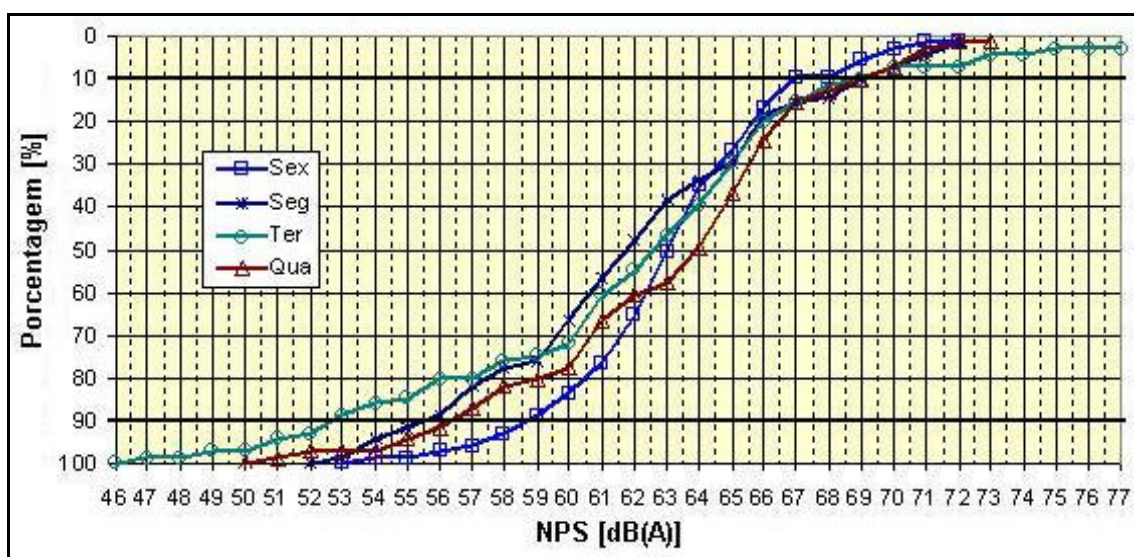


Figura 17 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 4.

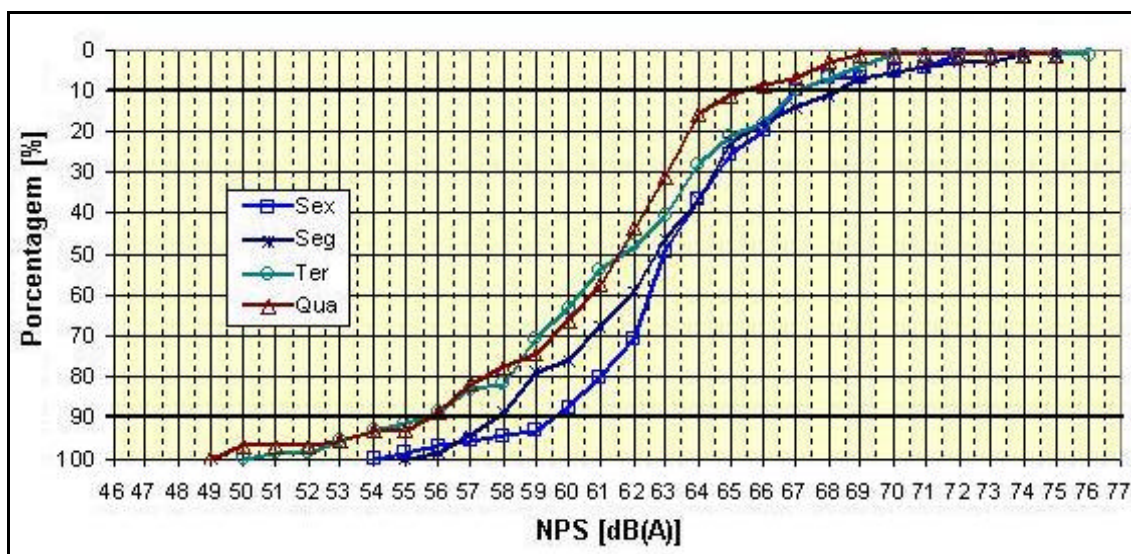


Figura 18 - Distribuição percentual dos valores medidos no Ponto 5.

4.6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA ESTIMATIVA DE ERROS E CORREÇÕES

Nos gráficos apresentados na Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22 e Figura 23 estão apresentados, para cada ponto de medição, os níveis de ruído obtidos para cada um dos indicadores, em cada dia da semana. Em seguida são calculados os erros e correções aplicáveis aos resultados. A análise dos dados obtidos, apresentados em forma de gráficos, servirá para caracterizar o comportamento do ruído emitido pela via de tráfego em estudo.

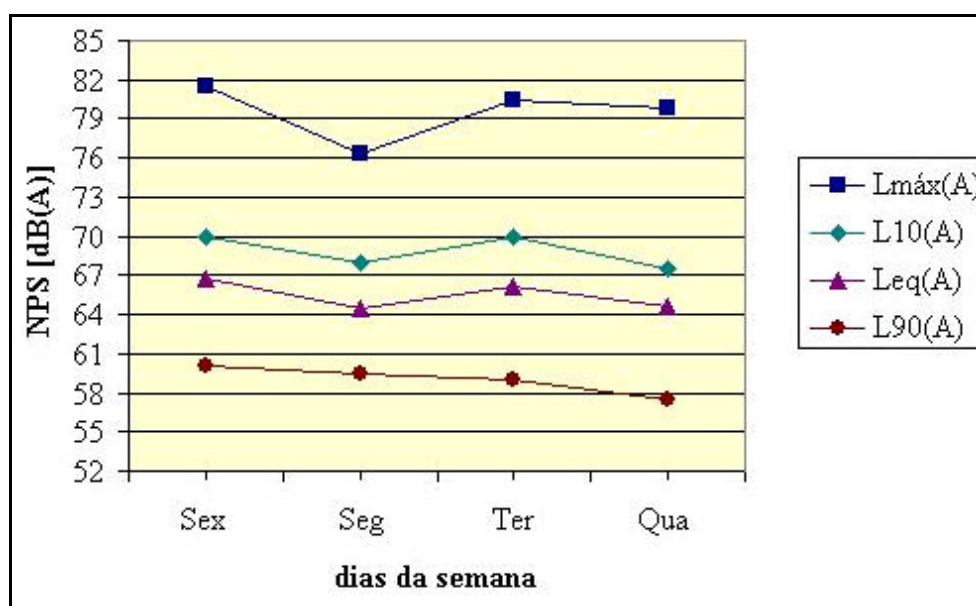


Figura 19 - Ponto 1: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.

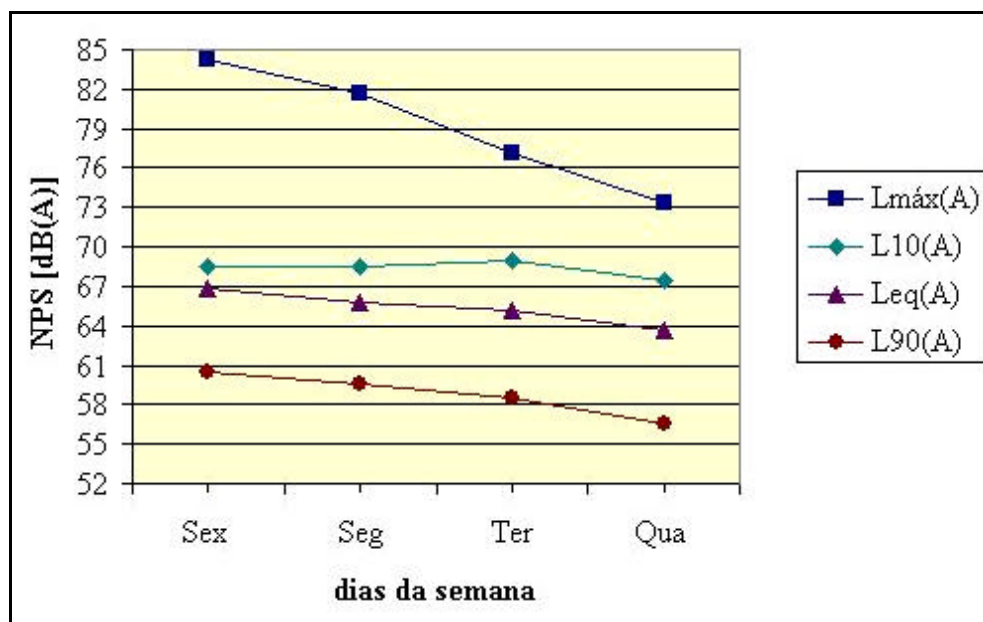


Figura 20 - Ponto 2: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.

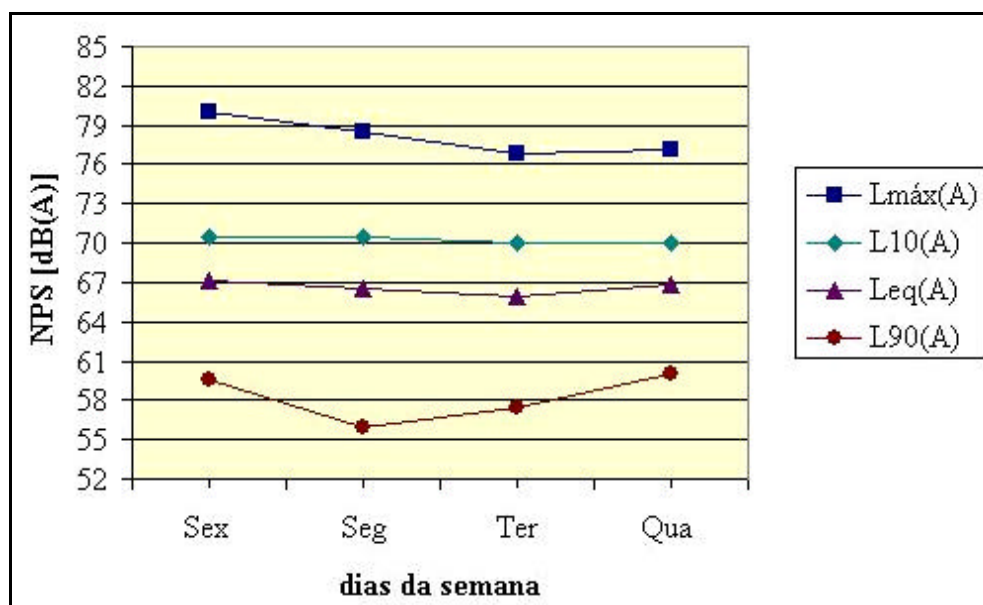


Figura 21 - Ponto 3: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.

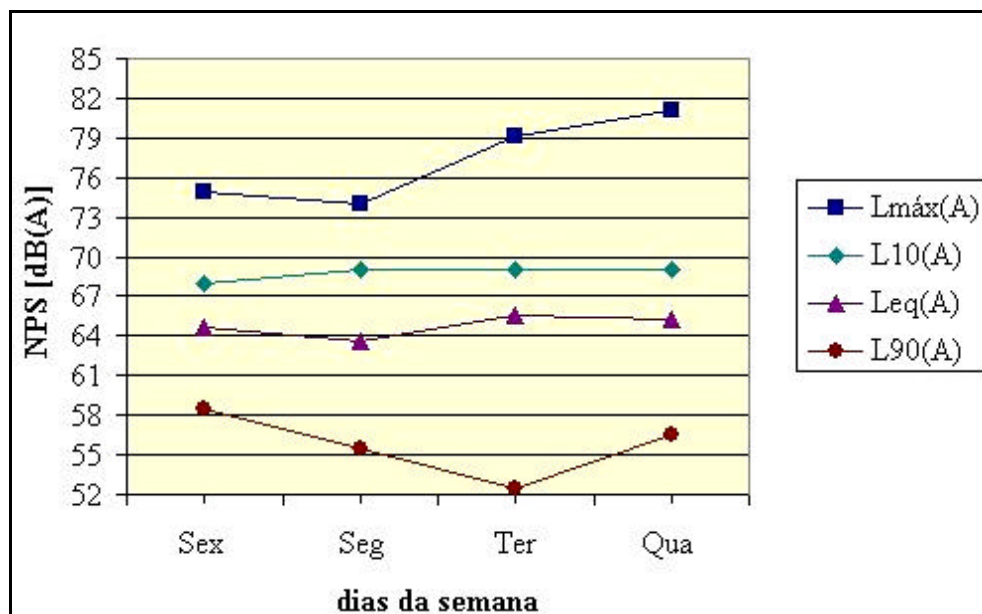


Figura 22 - Ponto 4: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.

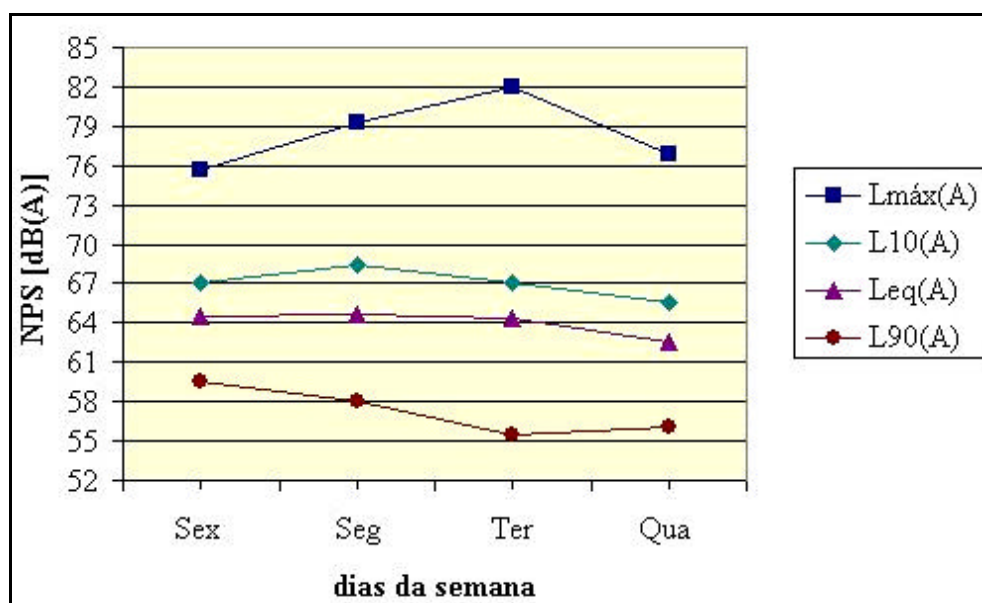


Figura 23 - Ponto 5: valores em dB(A) para os indicadores de ruído, para cada dia de medição.

Através do cálculo estatístico apresentado no item 4.3.1 foi calculada a medida da dispersão em torno da média, em dB(A). Dessa forma, foi estabelecido o desvio padrão, assim como o valor absoluto para 90% de intervalo de confiança para a média. A partir desses resultados, apresentados na Figura 24, Figura 25, Figura 26 e Figura 27, foi possível inferir sobre a precisão da média para os indicadores Leq(A), L10(A), L90(A).

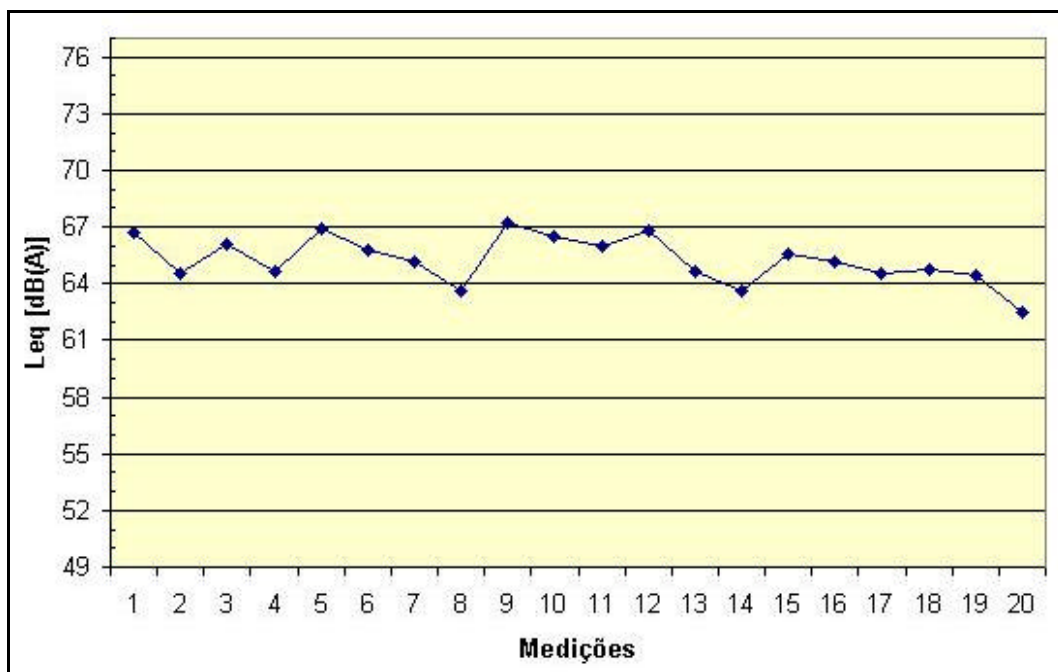


Figura 24 - Variação dos valores Leq(A) obtidos nas medições ao longo da via.

Os valores Leq(A) apresentam um desvio padrão de 1,26 dB(A), mostrados no gráfico da Figura 24. Foi calculado um valor menor que ± 1 dB(A) para o intervalo de confiança.

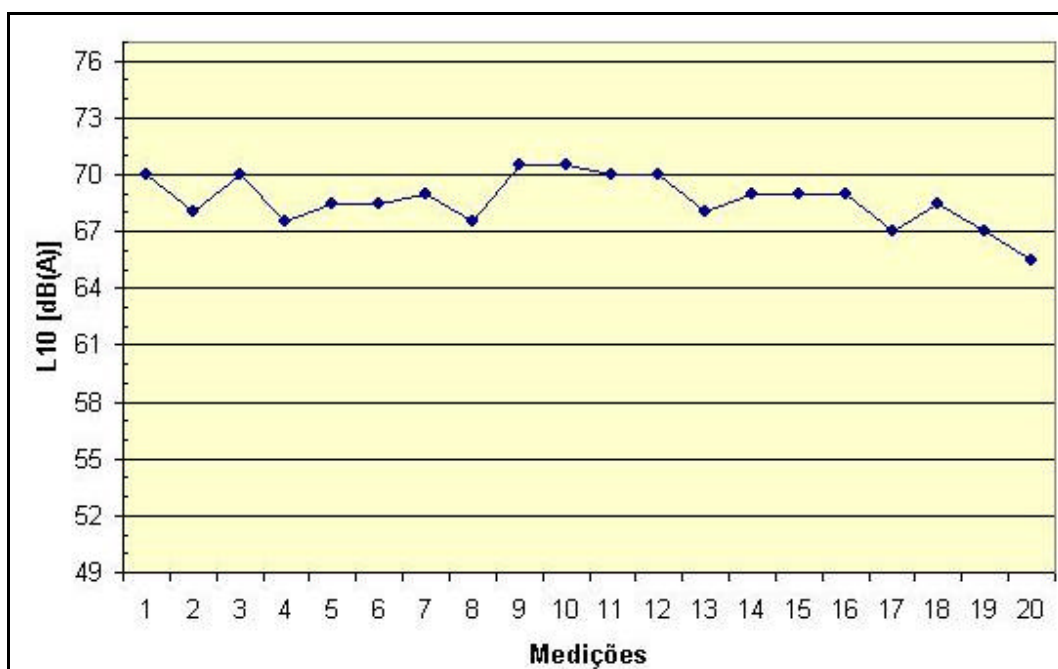


Figura 25 - Variação dos valores L10(A) obtidos nas medições ao longo da via.

Os valores L10(A), mostrados no gráfico da Figura 25, apresentam um desvio padrão de 1,33 dB(A), praticamente igual ao calculado para Leq(A). Foi calculado, para um intervalo de confiança, um valor menor que ± 1 dB(A).

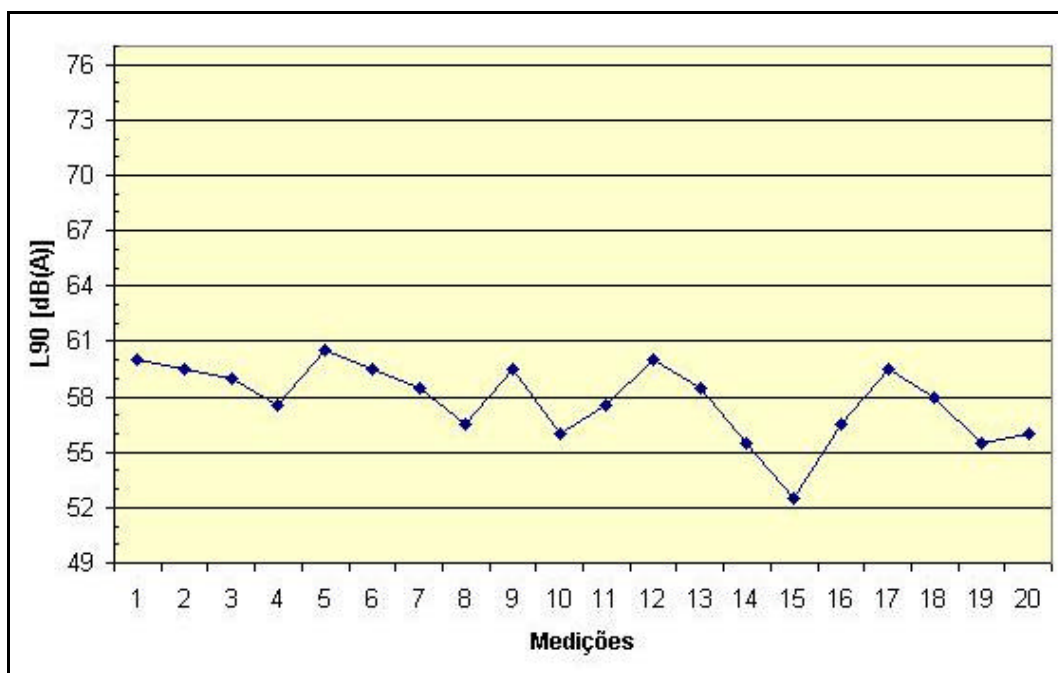


Figura 26 - Variação dos valores L90(A) obtidos nas medições ao longo da via.

Os valores L90(A), mostrados no gráfico da Figura 26, apresentam o maior valor para o desvio padrão, igual a 2,05 dB(A). Foi calculado um valor menor que ± 1 dB para o intervalo de confiança.

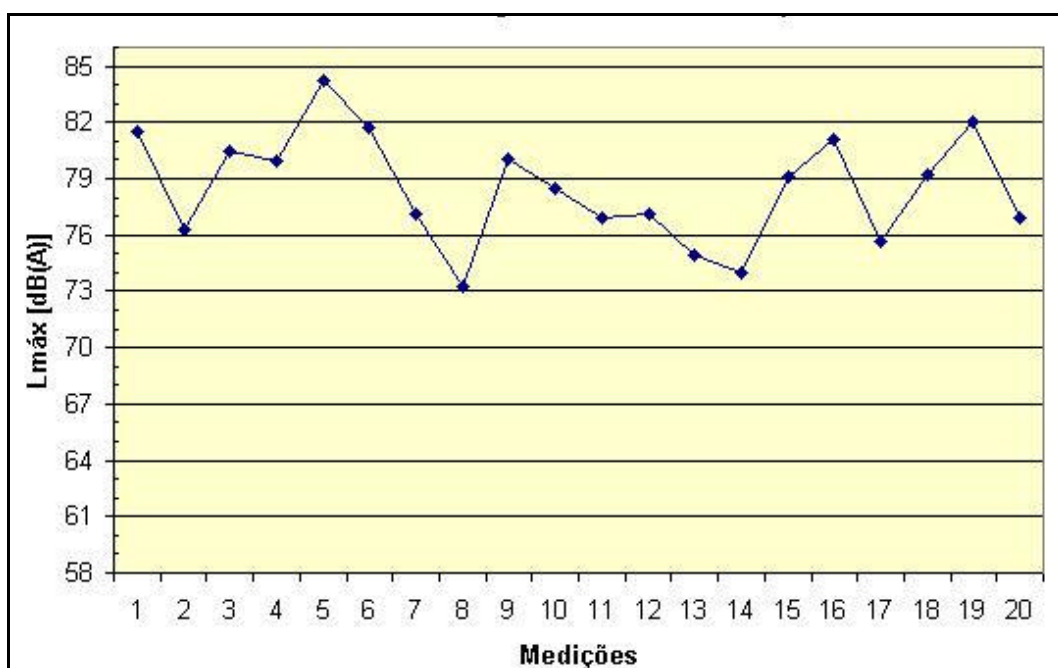


Figura 27 - Variação dos valores Lmáx(A) obtidos nas medições ao longo da via.

Além desses erros calculados, deve ser somado o erro de $\pm 0,7$ dB, para a classe do instrumento de medição Tipo 1, segundo classificação da Tabela 6. Consultando o diagrama

da Figura 10, é possível afirmar que, para seis minutos de medição para o período diurno, pode ser considerada uma correção de +0,5 dB para L_{eq} e L_{10} , e de -1,0 dB para L_{90} . Pelo diagrama da Figura 11, pode-se observar que, para uma amostragem a cada cinco segundos para o período diurno, a correção para L_{90} , L_{10} são desprezíveis, assim como a correção para L_{eq} , pois esse foi medido automaticamente pelo aparelho. Outra vez não há sentido em aplicar correções aos valores $L_{máx}$, visto que esses são valores instantâneos, únicos para cada eventual medição.

4.6.1 Comportamento do ruído nos diferentes pontos de medição

A Figura 28 apresenta o valor das médias entre os dias de medição, para cada indicador de ruído, em cada um dos pontos de medição. A análise dos resultados caracteriza um comportamento estável do ruído ao longo do trecho de interesse da via estudada.

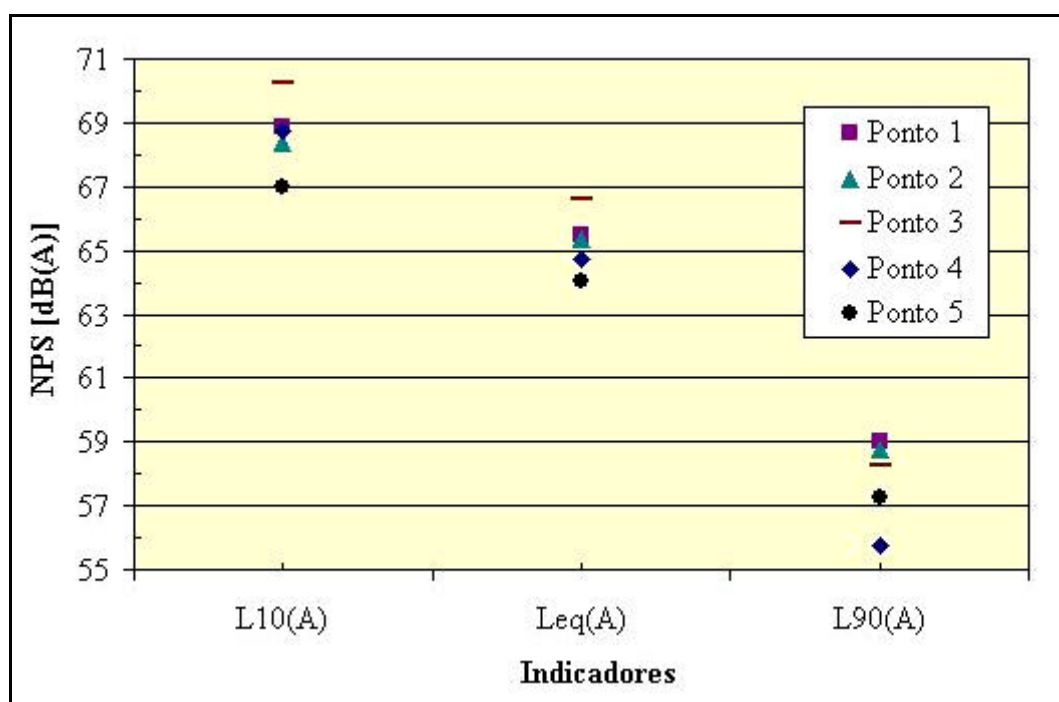


Figura 28 - Comparação das médias entre os diferentes dias de medição, para cada indicador de ruído em cada um dos pontos de medição.

Analisando o gráfico da Figura 28, em conjunto com o mapa apresentado na Figura 13, pode-se observar que a média dos indicadores L_{eq} e L_{10} foi maior no ponto 3, provavelmente pela influência de reflexões de edificações próximas, e para L_{90} no ponto 1, talvez pela proximidade do estacionamento. Os níveis mais baixos ocorreram no ponto 5, para

Leq e L10, e no ponto 4, para L90, provavelmente porque esses pontos estão numa área em campo aberto, menos expostos a reflexões.

4.6.2 Comportamento do ruído nos diferentes dias de medição

A Figura 29 apresenta o valor das médias entre os pontos de medição, para cada indicador de ruído, em cada um dos pontos de medição. Os resultados caracterizam um comportamento estável ao longo da semana nos dias e horários de atividade de aula.

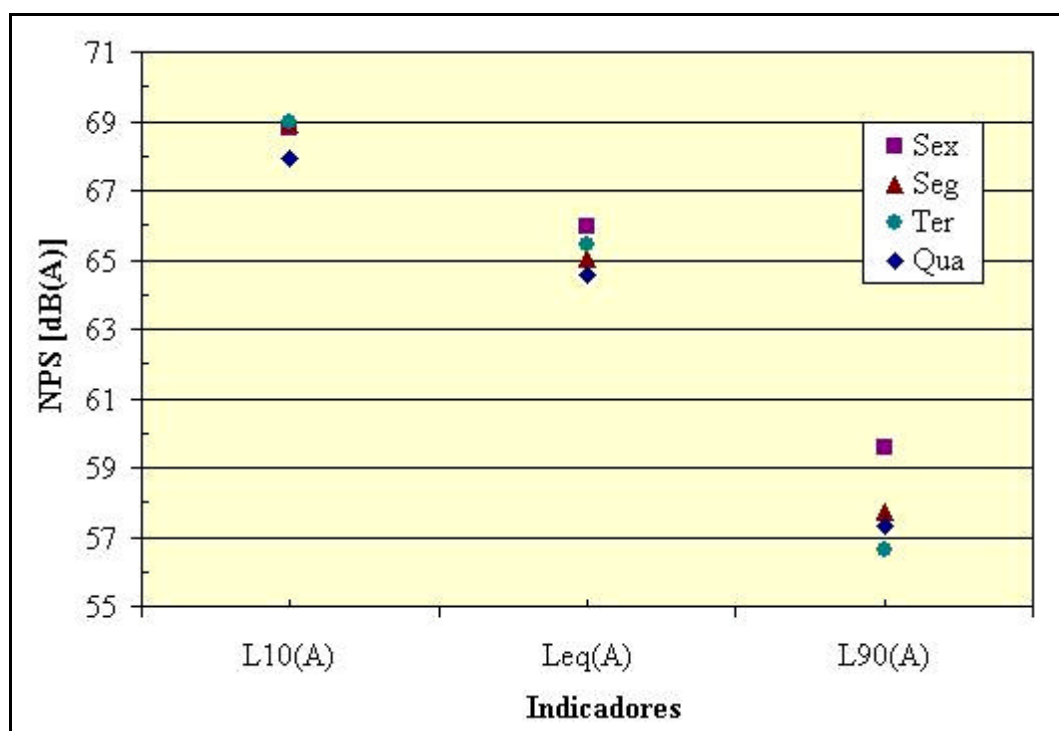


Figura 29 - Comparação das médias entre os diferentes pontos de medição, para cada indicador de ruído, em cada um dos dias de medição.

Analisando o gráfico apresentado na Figura 29, pode-se observar que os maiores valores aconteceram para Leq e L90, na sexta-feira, e para L10 na terça-feira. Os níveis de ruído mais baixos ocorreram na quarta-feira, tanto para Leq e L10, quanto para L90. Diversos fatores podem influenciar os resultados apresentados. Dado o limitado número de amostras, não é prudente, então, tentar estabelecer uma correlação entre os resultados e o comportamento do tráfego na via em estudo, em relação aos dias da semana.

4.7 ANÁLISE PRELIMINAR DOS NÍVEIS DE RUÍDO GERADOS PELA VIA

A Figura 30 mostra o gráfico com todos os valores obtidos para cada indicador de ruído e a média calculada desses valores. A partir desse gráfico, é possível visualizar a amplitude de variação dos dados medidos e, também, fazer uma comparação entre os valores médios de cada indicador. Essa análise revela informações importantes para caracterização do comportamento da via em estudo. As correções aplicadas foram +0,5 dB para Leq, +0,5 dB para L10 e -1,0 dB para L90. Foi considerado um erro total máximo de $\pm 1,7$ dB.

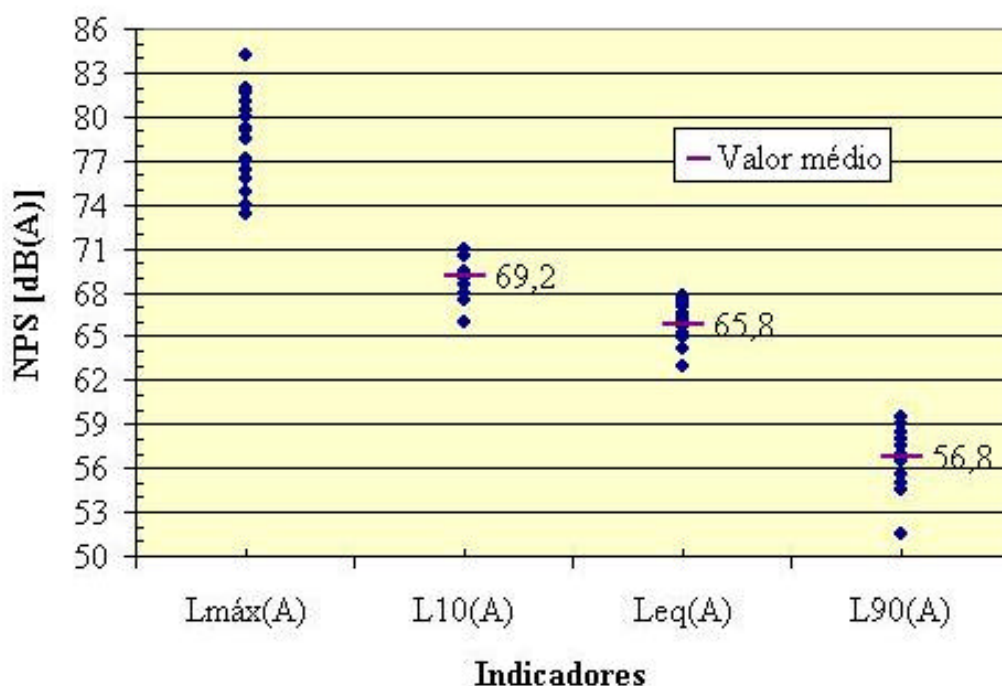


Figura 30 - Valores medidos para os dias e pontos de medição, para cada indicador de ruído.

O indicador L90 apresenta um valor médio de 56,8 dB(A), chegando a atingir o valor de 60 dB(A). Esse valor pode ser classificado como desconfortável, considerando que esse é o ruído ambiente ao longo da via em 90% do tempo, sendo um nível de ruído capaz de interferir na conversação normal entre duas pessoas próximas (BURNS, 1973) afetando diretamente, então, tanto os usuários nos passeios de pedestres ao longo da via, quanto nas áreas externas próximas, diretamente expostas ao ruído.

O indicador Leq apresenta um valor médio próximo a 66 dB(A), valor que já está acima do admitido pelas legislações internacionais para ruído de tráfego (BRÜEL & KJAER, 2001). Além disso, já exige que eventuais janelas voltadas para a via tenham que ser fechadas,

para que a exigência acústica de algumas atividades, segundo a norma brasileira NBR 10152 (ABNT, 2000), possa ser obtida.

O valor médio calculado para o indicador L10 mostra que, para 10% do tempo, o nível de ruído na área será próximo a 70 dB(A). Esse nível de ruído praticamente impossibilita a conversa entre duas pessoas e é capaz de prejudicar a percepção de sinais sonoros como um chamado de alerta ou de perigo.

Os valores para o indicador L_{máx} estiveram acima de 80 dB(A) para 35% das medições e acima de 75 dB(A) para 90% das medições. Pode-se concluir, então, que os níveis de ruído máximos no local, podem causar interferências sonoras bastante significativas na compreensão do som, principalmente da informação falada, e agir como potencial causador de interrupções e conseqüente irritação dos usuários no local. Esses efeitos são ligados diretamente à perda de concentração, tanto de professores quanto dos alunos, um fator que, além da inteligibilidade, é de extrema importância para a transmissão do conhecimento.

4.8 CONCLUSÕES

Com as informações obtidas neste Capítulo foi possível estabelecer o comportamento do ruído de tráfego na via principal da área de estudo, assim como chegar a algumas conclusões sobre os níveis de ruído atuais, aos quais os usuários do local estão expostos. Para atividades de ensino, a análise dos valores apresentados para os indicadores de ruído demonstra que, atualmente, a via de tráfego já gera níveis de ruído capazes de degradar a qualidade da inteligibilidade da fala dentro de salas de aula de edificações próximas. Apesar de não caracterizar-se como um estudo estatístico detalhado, os dados são suficientes para concluir que o comportamento do ruído da via de tráfego no trecho estudado é bastante estável e uniforme, viabilizando a utilização dos valores médios para quantificação e análise dos indicadores de ruído e, dessa forma, um estudo de impacto de ruído utilizando o indicador Leq. Com essas conclusões é possível estabelecer critérios para orientação da análise do impacto de ruído de tráfego para a área de estudo.

No próximo Capítulo será apresentada a investigação efetuada sobre o funcionamento das ferramentas de cálculo e simulação, para previsão dos futuros níveis de ruído na área de

estudo, quando inseridos a nova via de tráfego planejada e o novo edifício escolar projetado para o local.

5 CAPÍTULO - PREVISÃO DE IMPACTO DE RUÍDO AMBIENTAL

No Brasil, leis federais (CONAMA, 1986 e BRASIL, 2001) exigem estudos de impacto de vizinhança e de impacto ambiental para avaliação dos problemas, inclusive da emissão de ruídos, que a implantação de novas vias ou mudanças nas condições de tráfego, possam gerar para o meio ambiente. Nos casos onde se deseja estimar os níveis de ruído ambiental, simulações podem ser efetuadas utilizando modelos matemáticos, implementados através de programas computacionais. Essas simulações são particularmente úteis para investigar o impacto de ruído de tráfego, pois são capazes de estimar os efeitos combinados de um grande número de fontes por um longo período de tempo, inserir os diversos efeitos que influenciam na propagação e, a partir disso, estimar o nível de ruído sonoro.

Neste Capítulo, são apresentadas as ferramentas para cálculo e simulação do ruído gerado por vias de tráfego, utilizadas para avaliação do impacto na área de estudo. Destacam-se os parâmetros relevantes do método de cálculo para previsão de ruído em estradas, norma nacional alemã RLS90, e do programa computacional SoundPLAN®, para simulação de ruído de tráfego. Com essas informações, é possível estabelecer os erros e as limitações da previsão dos níveis de ruído de tráfego, na análise do impacto do ruído na área em estudo.

5.1 PROGRAMA COMPUTACIONAL SOUNDPLAN®

Toda simulação baseia-se em um modelo matemático onde as informações da situação real são transferidas. A geometria dos elementos que compõem o ambiente de simulação, incluindo todos os objetos que influenciam a propagação do ruído, é criada como um modelo geométrico tridimensional. Dentro do planejamento urbano, as simulações são importantes ferramentas para avaliar os efeitos de modificações e a eficácia da implantação de estratégias de controle ruído. As simulações permitem comparar diferentes configurações para a fonte, para o meio de propagação e para diferentes pontos receptores. O resultado dessas comparações, e não o valor absoluto dos níveis de ruído, permite avaliar o impacto que tais modificações podem gerar nos níveis de ruído em uma área. O programa de simulação

SoundPLAN® foi utilizado para prever os níveis de ruído resultantes das alterações na situação do estudo de caso. Serão abordados, a seguir, os procedimentos e considerações gerais sobre o programa.

No modelo geométrico construído, uma área de cálculo define os limites onde uma malha de receptores se distribui. Cada ponto de cruzamento da malha é considerado um receptor, conforme ilustra a Figura 31. Todos os mapas gerados são derivados dos níveis sonoros calculados para todos os pontos malha de receptores, definida pelo usuário.

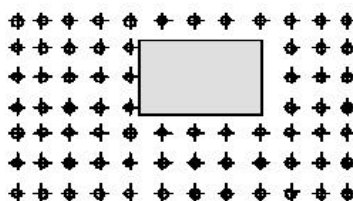


Figura 31 - Pontos receptores definidos pela malha de receptores.

A altura definida para os pontos receptores, em relação ao piso, é computada a partir das curvas de nível do terreno criado no modelo geométrico digital, como mostra a Figura 32. Todas as fontes sonoras localizadas em um raio de até 5500 metros de um ponto receptor são consideradas e todos os cálculos varrem o modelo geométrico em 360 graus, incluindo a influência de todos os objetos criados. Para receptores próximos a fachadas, as reflexões do próprio edifício podem ser computadas, dependendo das especificações do método de cálculo utilizado. Os receptores no interior de edifícios são automaticamente desconsiderados.

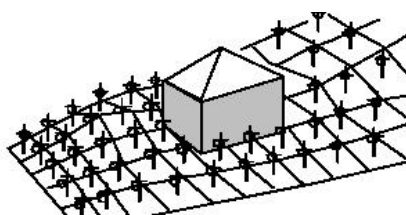


Figura 32 - A altura dos pontos é definida pela topografia digitalizada.

Quando uma malha de pontos receptores é criada, a área de cálculo é dividida em grupos de receptores que, para o cálculo do nível de ruído, são organizados em matrizes. Os valores dos pontos receptores localizados nos vértices de cada matriz são sempre calculados, formando duas diagonais, e o ponto central de cruzamento dessas diagonais é calculado e interpolado, conforme ilustra a Figura 33. Os pontos internos à matriz somente serão interpolados se: os pontos dos vértices estiverem dentro da área de cálculo, a diferença entre o grupo de receptores calculados for menor do que a diferença entre um determinado valor, em

dB e, também, se as interpolações para o ponto central não possuírem um desvio maior do que um determinado valor, em dB. Se a matriz não preencher esses critérios para a interpolação, esta é dividida em quatro matrizes menores e o processo é repetido. Esse processo continua até que todos os pontos receptores da matriz sejam calculados ou interpolados.

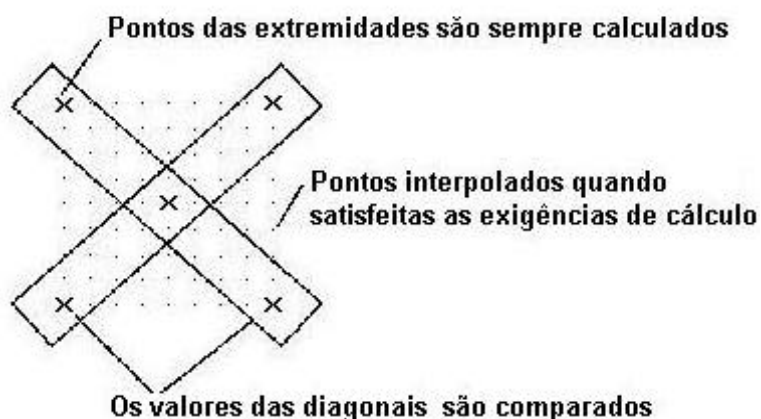


Figura 33 - Interpolação dos pontos receptores de uma malha de receptores.

As contribuições dos efeitos em cada ponto receptor são identificadas através de raios de busca que, partindo do receptor, seccionam todos os objetos criados no modelo geométrico digital em ângulos de varredura, como mostra a Figura 34. Quando uma fonte é encontrada, a contribuição do ruído para o receptor é calculada considerando os efeitos acústicos envolvidos. Essas contribuições são adicionadas para gerar o nível de ruído em cada receptor.

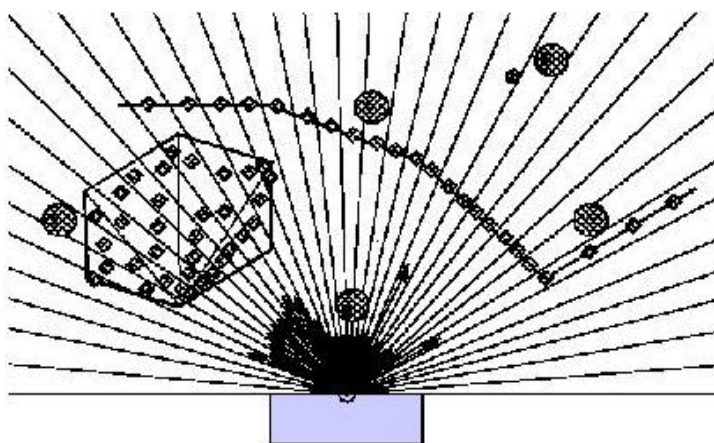


Figura 34 - Princípio de funcionamento do ângulo de varredura.

As fontes lineares, utilizadas para representar vias de tráfego, são divididas em seções menores, tratadas como fontes pontuais. O comprimento dessas seções devem ser maiores do que a metade da distância entre o receptor e o ponto médio da seção da fonte, como ilustra a Figura 35. O raio de busca encontra e marca a seção de todas as fontes que estão dentro de um

ângulo de varredura. Depois que o caminho direto do ruído é calculado, a posição do receptor é espelhada e, a partir dessa posição, as contribuições de reflexões são identificadas.

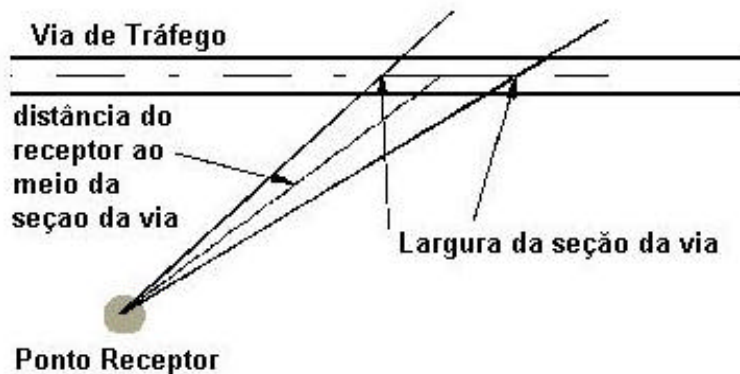


Figura 35 -Tratamento de fontes lineares.

Na construção dos modelos geométricos digitais, a via de tráfego é inserida como uma fonte linear, definida por pelo menos dois pontos. A emissão de ruído é uniforme para toda sua extensão. As linhas de elevação devem ser utilizadas para descrição de cotas de curvas de nível de um terreno e para definir cortes ou aterros à margem de rodovias. Barreiras devem ser inseridas para representar muros ou divisórias e, também, em topo de edifícios, para incluir os efeitos de difração. Curvas de nível só agem como barreiras quando é criado um caminho extra no trajeto direto da propagação entre a fonte e o receptor. A interferência direta entre os efeitos de barreiras e efeitos do piso em conjunto não é considerada.

5.2 PARÂMETROS CONSIDERADOS PELO PROGRAMA COMPUTACIONAL

A seguir será descrito o funcionamento dos principais parâmetros considerados pelo programa computacional, para simulação dos níveis de ruído em uma área, sendo esses: distância e ângulo de incremento, efeitos da difração, reflexões simples e múltiplas, atenuação por reflexão, interferência do piso, absorção por um grupo de objetos e absorção do ar.

A precisão no cálculo do nível de ruído no ponto receptor será maior quanto menor a distância entre o ponto receptor e os objetos criados no modelo digital. Diminuir o ângulo de incremento entre os raios de busca causa um aumento direto na precisão dos resultados. Um ângulo de incremento de um grau é considerado um valor ótimo entre a precisão e a

velocidade do cálculo. Para calcular um mapa de ruído para uma grande área, é possível selecionar 2 ou 5 graus para economizar o tempo de cálculo sem perda significativa da precisão (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000).

Os efeitos da difração da onda sonora são considerados para barreiras, elevações do terreno e objetos. Os efeitos de difração vertical são considerados automaticamente enquanto a difração horizontal, pela lateral de objetos, só é processada se for selecionada pelo operador.

O programa calcula reflexões simples e múltiplas, espelhando o receptor e procurando por fontes para o receptor espelhado, a partir do ponto onde a última superfície refletora foi reconhecida. A quantidade da energia sonora absorvida por uma superfície pode ser ajustada. Para ruído de tráfego, são utilizados os valores de atenuação por reflexão, em dB(A), apresentados na Tabela 7 (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000), desconsiderando a influência do espectro da frequência na performance de absorção de uma superfície.

Tabela 7 - Correspondência do coeficientes de absorção e as perdas por reflexão (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000).

Perdas por reflexão [dB(A)]	-0,5	-1,0	-1,6	-2,2	-3,0	-4,0	-5,2	-7,0	-10	-100
Coefficiente de absorção	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0

Os efeitos resultantes da interferência do piso, são dependentes apenas da distância entre fonte e o receptor e da altura de 'visão' média do receptor. Esse é o parâmetro que apresenta a maior diferença entre as normas.

O trajeto, no plano vertical, que liga a fonte ao receptor, é definido por um arco de raio igual a 5500m. O trecho desta distância que atravessa uma área de absorção definida, por exemplo um bosque ou um grupo de edifícios, é considerado para a atenuação. A perda total é calculada definindo-se a atenuação por metro em dB(A).

Nenhum dos métodos de cálculo para previsão de ruído de tráfego presentes no programa, utilizam os dados atmosféricos para prever as perdas por absorção do ar. Seus efeitos na propagação do ruído são implícitos no cálculo, sendo estimados de maneira superficial.

5.3 MÉTODOS DE CÁLCULO

Atualmente, a maioria dos métodos de previsão utiliza o nível contínuo equivalente Leq , com os valores ponderados pela curva “A”, como indicador do ruído de tráfego. Alguns dos modelos mais recentes já apresentam os valores para os níveis de ruído em bandas de oitava. Os métodos de cálculo são sempre divididos em duas etapas: um procedimento para previsão do ruído emitido pela fonte e outro para a previsão dos efeitos da propagação até o ponto de recepção. A partir da análise dos princípios gerais de cálculo dos principais modelos para previsão da emissão e propagação de ruído por vias de tráfego, atualmente em uso na Europa, a seguinte fórmula geral foi obtida (LEEuwEN et al., 1997):

$$Leq = E - Dd - Da - Dg - Db + Cr - Cm \quad [dB \text{ ou } dB(A)] \quad (12)$$

Onde:

- Leq nível de pressão sonora equivalente no ponto receptor.
- E emissão de ruído de uma fonte, dado pelo nível de potência sonora ou pelo nível de pressão sonora em um ponto de referência definido.
- Dd Atenuação pela distância entre o receptor e a via como resultado do espalhamento geométrico.
- Da Atenuação por absorção atmosférica.
- Dg Atenuação por efeitos do piso.
- Db Atenuação pela ação de barreiras.
- Cr Correção pelo efeito das reflexões.
- Cm Correção por efeitos meteorológicos.

Entretanto, uma comparação de métodos de cálculo utilizados por países europeus para previsão de ruído de tráfego, entre estes o RLS90, demonstrou que há ainda grandes diferenças no tratamento dos diferentes parâmetros (LEEuwEN et al. 1996). O trabalho conclui que ainda falta clareza na definição dos tipos de veículos, na dependência da emissão de ruídos com a velocidade para veículos pesados, nos parâmetros que determinam a influência de diferentes tipos de pavimentação e nas suposições em torno dos efeitos do grau de inclinação da via.

A interpretação dos princípios físicos pelo programa SoundPLAN® depende da norma utilizada. Segundo o fabricante BRAUNSTEIN + BERNDT (2000), a precisão dos cálculos

para qualquer das normas disponíveis apresenta um erro de, no máximo, $\pm 0,2$ dB. Todas as normas disponíveis no programa computacional para simulação de ruído, apresentadas na Tabela 8 (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000), apresentam um raciocínio semelhante à equação (12), entretanto o valor do ruído emitido pela fonte, calculado a partir das características do tráfego a uma certa distância de referência, varia de norma para norma.

Tabela 8 - Normas para ruído de tráfego utilizadas no SoundPLAN® (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000).

Norma	País de origem	Ano de publicação
RLS 90 / DIN 18005	Alemanha	1990 / 1987
ÖAL 23	Áustria	-
Método do EMPA	Suíça	-
Statens Planverk 48	Escandinávia	1989
CoRTN	Inglaterra	1988
Federal Highway Model	EUA	1978
Modelo da Sociedade Acústica do Japão	Japão	1994

Para previsão dos níveis de ruído na área estudada, foi utilizado o método de cálculo para previsão de ruído para rodovias da norma alemã RLS 90. Esse é um dos métodos de cálculo mais recentemente elaborados que, ao mesmo tempo, baseia-se em um método anterior amplamente testado e utilizado. São apresentadas, adiante, as características mais relevantes do modelo, assim como trabalhos que investigaram a precisão deste método de cálculo.

5.3.1 Previsão de ruído de tráfego segundo a norma RLS90

A Diretriz para Proteção de Ruído em Vias de Tráfego RLS90 (*Richtlinien für den Lärmshutz na Strabben*) é a norma legal alemã para previsão de ruídos. Essa versão de 1990 vem aprimorar a antiga versão de 1981 (STEELE, 2001). A RLS 90 estabelece normas técnicas específicas para procedimentos de medição, previsão e controle de ruído para vias de tráfego e estacionamentos e especifica limites para os níveis de ruído no ponto receptor para os períodos diurno e noturno (BRAUNSTEIN & BERNDT, 2000). O método de cálculo para ruído de tráfego da norma RLS90 utiliza algoritmos que simulam o ruído a partir de uma

fonte sonora linear e calculam o nível sonoro equivalente total da fonte, $Leq(A)$, diretamente das características da via e do tráfego (LEEUVEN et al., 1996).

O cálculo RLS 90 considera, para cada pista de tráfego da via, uma fonte linear a 0,5m acima do piso. As fontes são semi-esféricas e reflexões são, então, consideradas para níveis de ruído global de emissão da via. A norma estabelece dois métodos de cálculo separados, um para estimativa do ruído emitido na fonte e outro para estimativa dos efeitos de propagação no ruído emitido, no ponto receptor. O nível sonoro de emissão da fonte, LmE , é calculado através da seguinte fórmula:

$$LmE = Lm100(25) + Dv + DStrO + DStg + DRef \text{ [dB(A)]} \quad (13)$$

O nível de ruído de referência, $Lm100(25)$, é calculado para um ponto localizado a 25m de distância da via e a 4m de altura do solo, para as seguintes condições: velocidade de 100 km/h para veículos leves e 80 km/h para veículos pesados, tipo de pavimentação da via de asfalto não fresado, gradiente <5% e propagação no campo livre. Seu valor varia dependendo do fluxo médio horário de tráfego e da percentagem de veículos excedendo 2,8 toneladas. O fator de correção para a velocidade, Dv , considera a contribuição do ruído gerado separadamente pelos veículos leves e pelos veículos pesados. A correção pelo tipo de pavimentação da via, $DstrO$, é computada de acordo com uma tabela que fornece os valores da contribuição do ruído para cada tipo de pavimentação em função da velocidade. A correção pelo gradiente da via, $DStg$, aplica um fator de multiplicação a porcentagem de inclinação, e é a mesma tanto para aclives, quanto para declives. O modelo também prevê, para vias rebaixadas ou entre barreiras, um fator de correção, $DRef$, para o aumento nos níveis de emissão, pela ação de múltiplas reflexões considerando o grau de absorção das superfícies, a altura e a distância entre as barreiras.

Para o cálculo da propagação, o modelo considera que a fonte linear, a partir de um ângulo de 'visão' do ponto receptor, é dividida em inúmeros segmentos. A emissão do ruído deste segmento é concentrada em um único ponto e as contribuições desses vários pontos são somadas, de maneira a representar a contribuição global da via. O modelo RLS90 considera os níveis da fonte em dB(A), não discriminando o espectro por bandas de frequência. O nível sonoro no ponto do receptor é calculado através da seguinte fórmula:

$$Lm = LmE + CSection \text{ length} + Ds + D_{BM} + D_E \quad (14)$$

A influência do meio de propagação é estimada a partir do nível sonoro médio de emissão, L_{mE} , calculando o nível de ruído no ponto receptor corrigido por efeitos no caminho de propagação. A correção pelo comprimento da seção, $C_{section\ length}$, é calculada considerando o comprimento da seção da via, determinado pelo ângulo de varredura a partir do receptor. O fator de correção para o efeito combinado da propagação e absorção pelo ar, D_s , depende da distância entre o ponto médio do comprimento da seção da via e o receptor. A correção por efeitos do piso, D_{BM} , depende da altura da linha de visão do ponto receptor em relação ao terreno, mas a impedância do piso não é considerada. A correção por efeitos meteorológicos, D_E , considera o efeito da densidade atmosférica em função da altitude, no direcionamento das ondas sonoras de volta ao solo.

5.4 COMPORTAMENTO DO MÉTODO DE CÁLCULO RLS90 EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Trabalhos investigam o comportamento dos parâmetros de simulações computacionais utilizando o método de cálculo RLS90. Testes com propagação em campo livre mostraram que as curvas de nível sonoro apresentam distribuição uniforme, com decaimento esperado de 3 dB pelo dobro da distância (WETZEL et al., 1999). Uma investigação de LEEUWEN et al. (1996) sobre o comportamento dos níveis de emissão de uma via para um ponto receptor localizado a trinta metros de distância da via e a dez metros de altura, demonstrou que, para veículos leves, ocorre um aumento linear de cerca de 1,25 dB(A) para cada aumento de 10 km/h na velocidade enquanto, para veículos pesados, foi observado um decaimento linear de 2 dB(A) nos níveis de emissão, para um aumento na velocidade média de 50 km/h até 80 km/h, estabilizando até 100 km/h. Para variação pelo efeito de inclinação da via, foi verificado por LEEUWEN et al. (1996) um aumento linear de 0,6 dB(A) para um aumento de 1% no gradiente de inclinação da via a partir de 5% de inclinação, não havendo mudança em gradientes menores que 5%. Um teste feito por WETZEL et al. (1999) mostrou que, modificando a porcentagem de veículos pesados de 20% para 100%, ocorre um acréscimo uniforme de 6 dB(A) nos níveis no receptor e, para uma redução do fluxo horário de tráfego de 3000 para 1500 veículos, ocorre uma atenuação uniforme de 3 dB(A) para os mesmos níveis.

5.5 PRECISÃO DO MODELO COMPUTACIONAL PARA PREVISÃO DE RUÍDO

Os cálculos matemáticos utilizados para previsão do comportamento de uma situação imaginária são derivados de estudos estatísticos de situações reais. Dessa forma, os erros contidos nesse processo devem ser estimados. Para estimativa dos erros na simulação do estudo de caso foi feita uma revisão bibliográfica para levantar as informações sobre o uso de programas computacionais para simulação de ruído de tráfego, incluindo o SoundPLAN®, e sobre a utilização do modelo matemático RLS90 neste programa.

Um estudo de LEEUWEN et al. (1996) verificou que a diferença entre os resultados obtidos por diferentes programas computacionais para simulação de ruído de tráfego é bastante significativa, não só para pontos distantes da fonte como, também, para pontos próximos. Neste estudo, diferentes programas computacionais foram comparados, todos simulando um mesmo modelo geométrico digital, composto de um terreno plano com uma via e um edifício a 1000m de distância. A comparação entre os resultados obtidos pelos diferentes programas para pontos entre a via e o edifício, em diferentes distâncias, apresentou diferenças de até 8 dB(A). Os pontos localizados junto à fachada apresentaram diferenças de até 12 dB(A). Para pontos localizados atrás do edifício, em relação à via, os resultados obtidos apresentaram diferenças de até 14 dB(A). Por outro lado, a comparação dos resultados obtidos por diferentes usuários, utilizando os mesmos programas computacionais, apresentou uma variação mínima, sugerindo que os erros na construção do modelo geométrico ou na entrada dos dados podem ser desprezados.

Em outra investigação, com a intenção de entender o funcionamento e comparar o comportamento relativo da propagação em modelos de previsão de ruído de tráfego, dentre eles o RLS90, WETZEL et al. (1999) testou a sensibilidade desses modelos aos parâmetros para as características da via e sua coerência com medições em uma situação real. Um modelo geométrico digital da área foi construído e as medições foram levantadas em Leq(A) integrado por cinco minutos, com reposta de leitura rápida. As simulações com o método RLS90 apresentaram resultados bem ajustados com os valores apresentados dos níveis de ruído de medições, em nove diferentes pontos. Apenas a uma distância de 80 metros, onde a atenuação medida apresentou um valor acima de -20 dB(A), a simulação apresentou um erro de -2,0 dB(A) em relação às medições. Foi, também, testada a atenuação pela distância em campo semi-livre para um terreno com 10% de declive, semelhante ao terreno do caso de

estudo dessa dissertação. Concluiu-se que o efeito de difração causado por ondulações do terreno faz com que a atenuação seja menos uniforme. O método RLS90 parece superestimar esses efeitos de difração, pois os valores simulados apresentaram níveis entre +3 dB(A) e +8 dB(A) maiores para os pontos medidos em diferentes distâncias da fonte.

No RLS90, quanto menor a distância de um ponto receptor a um cruzamento ou semáforo, maior a adição no nível de ruído deste ponto, para compensar o ruído gerado pela desaceleração e aceleração dos veículos (BRAUNSTEIN + BERNDT, 2000). Entretanto, medições efetuadas por WETZEL et al. (1999) apresentaram níveis de ruído menores no cruzamento do que os medidos ao longo da área de tráfego livre. Isto sugere que, em alguns casos, o efeito da desaceleração dos veículos, ao aproximarem-se do semáforo, pode ser mais acentuado que os efeitos de aceleração. Nesse mesmo trabalho, variando altura de um edifício próximo à fonte, somente foi constatada atenuação do ruído no ponto imediatamente atrás do edifício. Outros pontos localizados à frente do edifício, na outra margem da via, e outro a quatrocentos metros do edifício, não sofreram nenhuma alteração. Para essa mesma situação, uma alteração das características acústicas da fachada do edifício, de 0 para 100% de absorção, apenas gerou alterações nos valores de pontos bem próximos a essa. A comparação com as medições mostrou que, para pontos localizados atrás de edifícios, os níveis de ruído simulados estão sempre cerca de 2 dB(A) a 4 dB(A) acima dos valores medidos.

Dentro do aspecto de validação, a investigação de seis métodos de cálculo de níveis de ruído de tráfego mais utilizados internacionalmente, feita por STEELE (2001), concluiu que todos os modelos investigados vão ao encontro das exigências de regulamentações legais, suprimindo as necessidades de planejadores e projetistas. Nessa mesma investigação, o método RLS90 foi considerado um bom modelo para previsão da propagação. De negativo neste método, foi constatado que não há a possibilidade de obter os resultados de indicadores L%, que não é possível considerar interrupções mais complexas no tráfego e , também, que não é possível inserir dados mais detalhados sobre as características dos veículos locais.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Na construção do modelo geométrico digital há limitações em representar a situação real de estudo. Alguns parâmetros que influenciam nos resultados, como o coeficiente de absorção para fachadas ou muros, podem apenas ser estimados. Outros, como altura dos

edifícios, podem não ser fáceis de serem medidos na situação real. Além disso, para acelerar o processamento, é sempre desejável simplificar os detalhes dos objetos reais sem, no entanto, introduzir erros adicionais nos resultados da simulação.

As características da via de tráfego nem sempre são estáveis e, geralmente, apresentam características particulares em cada caso, o que dificulta a generalização de padrões de comportamento. É bastante complexa a estimativa da influência dos parâmetros envolvidos nos níveis de emissão da fonte. Para a estimativa dos efeitos de propagação até o ponto receptor, o maior problema está na aferição da influência das condições atmosféricas, que são flutuantes e bastante variáveis.

Para um estudo de comparação entre diferentes situações, como no estudo de impacto ambiental, os parâmetros relativos às características de tráfego e às características da via têm mais influência no nível sonoro absoluto emitido do que na propagação em si e, conseqüentemente, causam uma alteração uniforme dos níveis de ruído no ponto receptor. Dessa forma, embora o conhecimento dos valores precisos do fluxo de tráfego por hora, da porcentagem de veículos pesados, da velocidade média dos veículos, do tipo de pavimentação e do gradiente da via, possa permitir precisar a emissão real da fonte, a investigação de impacto ambiental lida mais com a influência da variação desses parâmetros nos níveis de ruído absolutos, identificando o peso relativo de cada elemento.

O objetivo principal das simulações para estudos de impacto é viabilizar a comparação de situações diversas, a manipulação dos elementos envolvidos e a visualização da influência desses elementos no resultado final. Não será utilizado nenhum tipo de correção para avaliação do impacto do ruído de tráfego, pois não serão considerados os valores absolutos e, sim, uma comparação entre as simulações da situação atual e da situação futura.

6 CAPÍTULO - SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE RUÍDO DE TRÁFEGO

Para correta avaliação do impacto de ruído, é preciso investigar o comportamento das ferramentas utilizadas para a simulação. Neste Capítulo são apresentados os resultados dos testes para ajuste dos parâmetros de cálculo no programa de simulação SoundPLAN® e, finalmente, será feita a verificação da correlação de medições do nível de ruído in loco, com os resultados simulados para os mesmos pontos, na área de estudo.

6.1 PARÂMETROS DE AJUSTE DE PRECISÃO DOS CÁLCULOS

Em um modelo simplificado criado para investigação, os resultados da modificação dos parâmetros de cálculo foram analisados, visando compreender seu nível de influência e definir ajustes. Foram definidos valores para que as simulações do estudo de caso apresentassem a melhor precisão, no menor tempo de processamento de cálculos possível. Os parâmetros testados que apresentaram mudanças significativas nos resultados das simulações são explicados de forma resumida. Outros parâmetros podem ser ajustados conforme os objetivos de cada estudo e enfoque da simulação, sem que implique perda de precisão.

O parâmetro “espaço de grade” (*grid space*) define a dimensão da malha de receptores, ou seja, a distância, em metros, entre os pontos receptores contidos na área de cálculo, definida no modelo geométrico. O parâmetro “ângulo de incremento” (*angle increment*) ajusta a distância angular entre os raios de busca de cada ponto receptor. Quanto menor os valores do “espaço de grade” e do “ângulo de incremento” maior será o tempo de processamento. Esses parâmetros devem ser definidos conforme a escala da área estudada e, principalmente, do grau de detalhamento das informações inseridas. A decisão de utilizar valores muito pequenos não necessariamente melhora a precisão dos resultados, pois aumenta a quantidade de informações computadas que, muitas vezes, não refletem a realidade.

O parâmetro “dimensão de campo” (*field size*) define a quantidade de pontos que contém a matriz de interpolação dos pontos receptores, que pode ser ajustada para 9x9, 5x5, 3x3 e 1x1 pontos. Quanto maior a matriz, mais pontos poderão ser interpolados, ou seja,

estimados por aproximação dos valores de pontos receptores diretamente calculados. Assim, quanto maior a matriz, menor o tempo de cálculo e menor a precisão dos resultados. Através do parâmetro “min/max”, o valor máximo da diferença entre os níveis de ruído calculados para os pontos das arestas de uma matriz de interpolação é definido. O parâmetro “diferença central” (*difference*) define a diferença máxima entre o ponto receptor calculado, central à matriz, e o valor interpolado, a partir dos níveis de ruído calculados para os pontos das arestas diagonais, para esse mesmo ponto. Quanto menor o valor ajustado para esses parâmetros, maior a precisão da interpolação dos níveis de ruído para os pontos internos à matriz.

O parâmetro “número de reflexões” (*number of reflections*) ajusta quantas reflexões de superfícies devem ser consideradas por cada raio de busca, a partir do ponto receptor. O valor do parâmetro “profundidade de reflexão” (*reflection depth*) define o número de edifícios, em seqüência, que cada raio de busca deve considerar para o cálculo da contribuição de reflexões no nível de ruído no ponto receptor. A função “habilitar difração horizontal” (*enable side diffraction*) habilita o cálculo da contribuição dos efeitos de difração lateral em objetos, para o nível de ruído total no ponto receptor. Quanto maior o número de objetos no modelo criado, maior será a contribuição das reflexões de superfícies e da difração, no valor total do nível de ruído em um ponto receptor e, conseqüentemente, um valor maior para o “número de reflexões” e “profundidade de reflexão” deve ser ajustado, para representar adequadamente a situação. A utilização da função “habilitar difração horizontal” segue, então, o mesmo raciocínio. Em alguns casos, para um estudo em particular, pode não ser desejado que os efeitos de reflexão sejam considerados.

6.2 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Através da construção de um modelo geométrico simples, com uma fonte linear em propagação em campo livre e alguns objetos, os parâmetros que influenciam as curvas de nível sonoro foram identificados e ajustados. Para a construção dos modelos geométricos é necessário definir a localização e as dimensões dos elementos inseridos. Edifícios, barreiras e curvas de nível do terreno são inseridos no modelo geométrico definindo o comprimento, largura e altura, de cada objeto e, para edifícios e barreiras, a absorção acústica das superfícies. Para as vias de tráfego é necessário definir o comprimento, a altura e a largura das

pistas de rolagem e, também, a distância da banda de emissão, isto é, da faixa de trânsito dos veículos, em relação aos limites laterais da via.

Um primeiro teste foi feito com o modelo apresentado na Figura 36. Em um terreno plano foi definida uma área de cálculo quadrada com 800 m de dimensão. Uma fonte linear exatamente reta, representando uma via, foi inserida com mediatriz exatamente no centro dessa área de cálculo. A via possui 3800 m de extensão, duas pistas de rolagem de 3,75 m e banda de emissão a 1,88 m do limite da via. O nível de ruído ao longo da via foi definido em $L_{eq} = 80$ dB(A). Os parâmetros estudados foram modificados até que a propagação, visualizada através das curvas de nível sonoro, apresentasse um padrão uniforme. Com os valores dos parâmetros ângulo de incremento = 1, espaço de grade = 10, dimensão de campo = 3x3, min/max = 5 e diferença central = 0,5 foi possível chegar a um resultado satisfatório, mostrado na Figura 36.

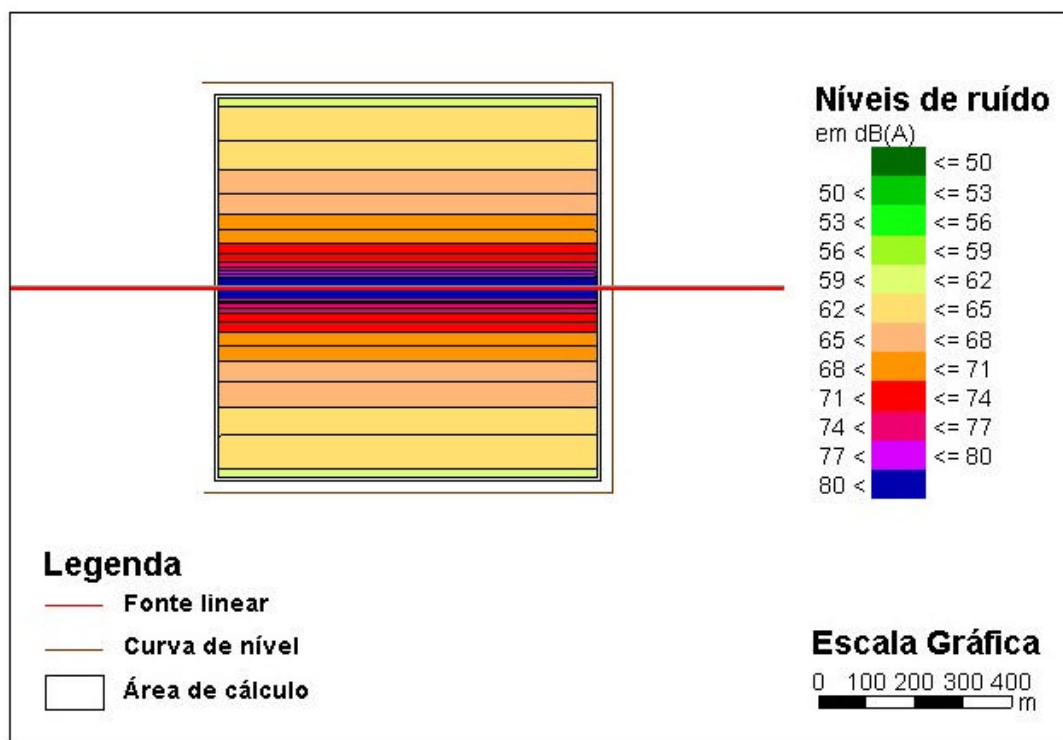


Figura 36 - Resultado dos testes da propagação do ruído de uma via em um terreno plano.

Em um segundo teste, um edifício foi inserido no modelo anterior, para ajuste dos parâmetros que influenciam na reflexão e difração. O edifício, representado por um volume simples em forma de cubo com dimensões de 50 metros, foi localizado exatamente no eixo central da área de cálculo. Os novos testes mostraram que os efeitos de propagação, e agora de difração e reflexão, se comportaram de maneira esperada, com as curvas de nível sonoro

simetricamente distribuídas. Alguns ajustes nos valores dos parâmetros definidos no primeiro teste tiveram que ser feitos. Os parâmetros “ângulo de incremento” e “número de reflexões”, foram identificados como os que mais influenciam na reflexão e difração. O parâmetro “profundidade de reflexão” não parece ter influência na situação com apenas um edifício. Com os valores dos parâmetros ângulo de incremento = 1, espaço de grade = 3, dimensão de campo = 3x3, min/Max = 5, diferença central = 0,5 e mais número de reflexões = 1, foi possível chegar ao resultado apresentado na Figura 37.

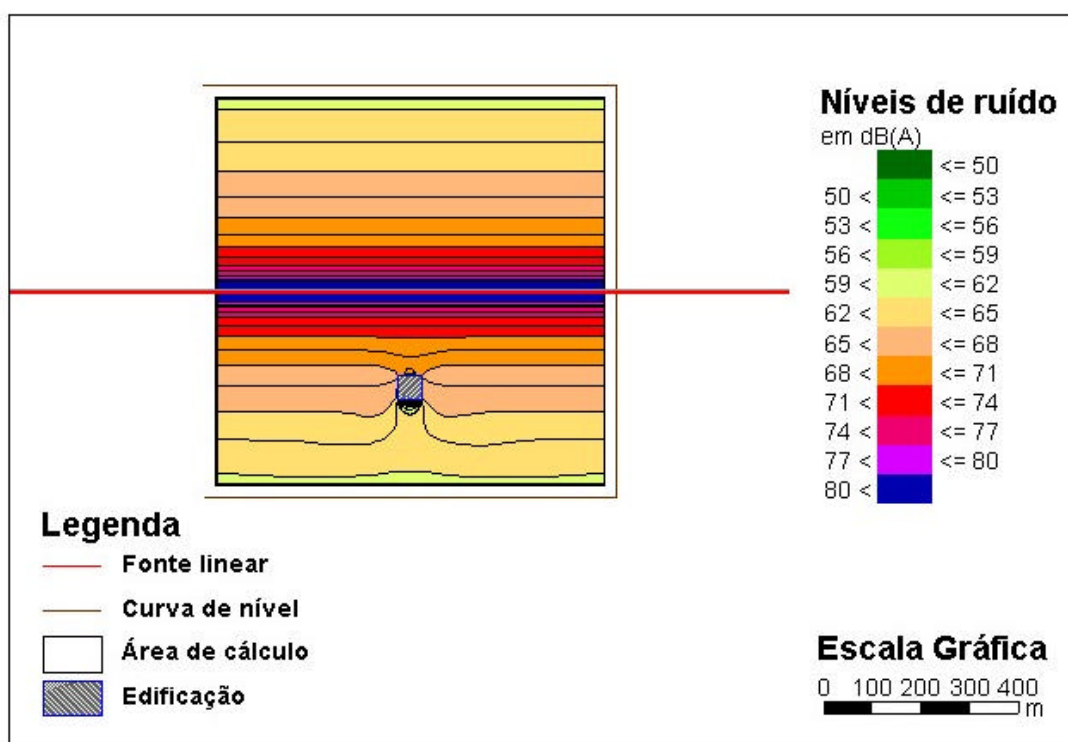


Figura 37 - Resultado do teste da propagação de ruído de uma via em um terreno plano e um edifício.

Num último teste, um grupo de quatro edifícios de dimensões semelhantes foi inserido aleatoriamente no modelo anterior. O único parâmetro que precisou ser ajustado foi o número de reflexões = 2. Não foi necessário mais nenhum ajuste nos valores dos parâmetros do modelo anterior. O resultado da nova simulação pode ser visto na Figura 38.

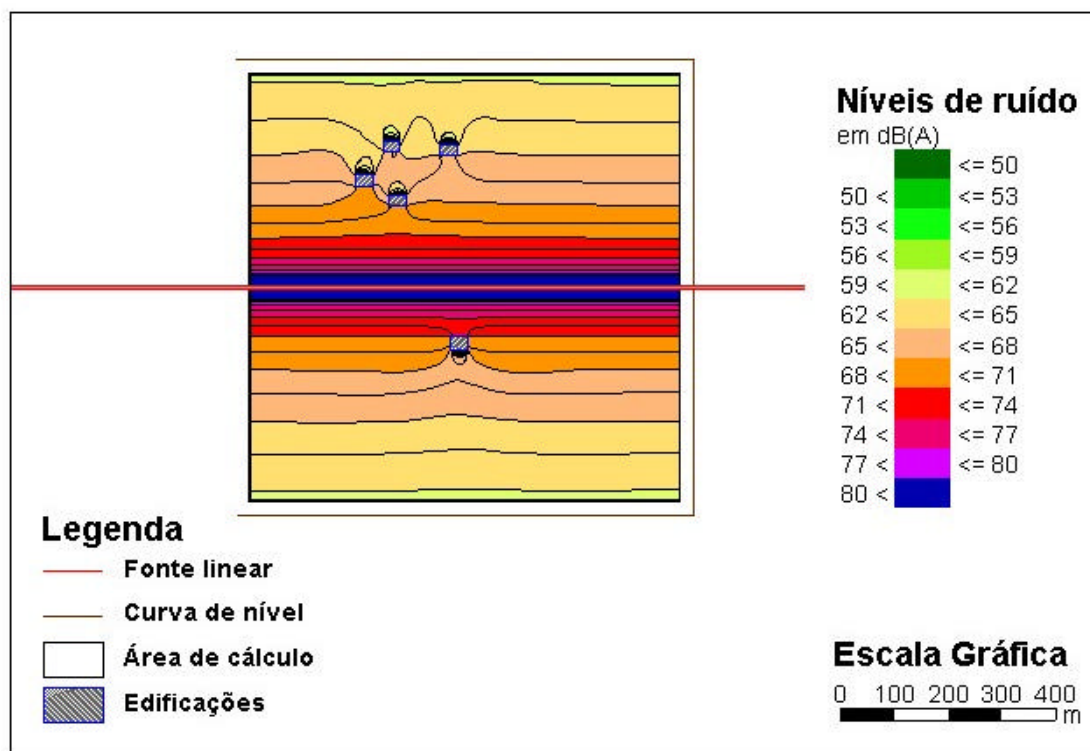


Figura 38 - Resultado do teste da propagação de ruído de uma via em um terreno plano e um grupo de quatro edifícios.

6.3 CRIAÇÃO DO MODELO GEOMÉTRICO DIGITAL PARA A ÁREA DE ESTUDO

Foi construído um modelo geométrico digital da área onde hoje se localiza o Departamento de Arquitetura e Urbanismo, dentro do campus da Universidade Federal de Santa Catarina. Esse modelo foi criado diretamente através do programa de simulação de ruído, SoundPLAN®. Toda a situação pôde ser desenhada eletronicamente através de uma planta do local, apresentada na Figura 39, fornecida pelo Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF, 2001) e por observação in loco para estimativa das alturas e dos detalhes relevantes dos edifícios circundantes à edificação estudada.

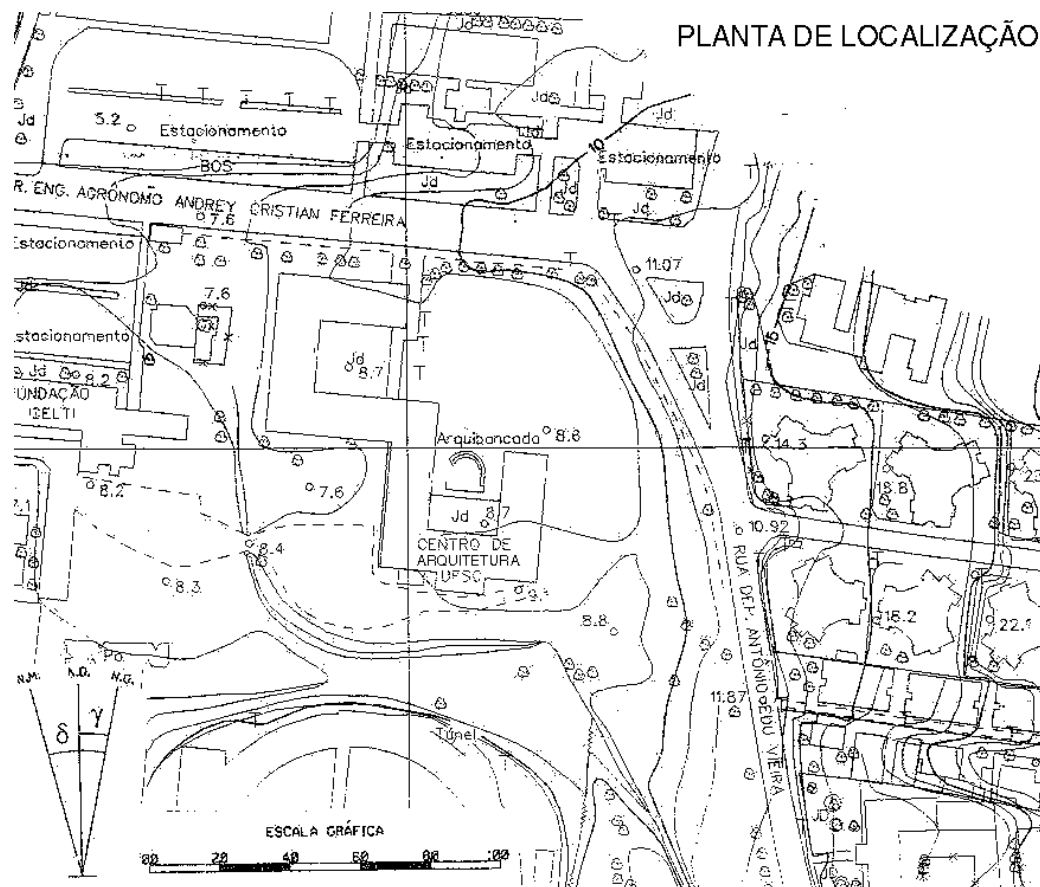


Figura 39 - Planta digitalizada de situação da área de estudo.

O terreno foi modelado através da digitalização das curvas de nível. Edifícios, ruas, estacionamentos e calçadas foram incluídos. Toda a geometria foi construída de forma simplificada, com as respectivas características requisitadas pelo programa, para que os efeitos físicos da propagação acústica fossem simulados com precisão. Após a inserção do modelo geométrico, foram atribuídos dados acústicos relevantes para cada elemento. Edifícios receberam o fator para atenuação por reflexão das fachadas padrão do programa, igual a -1 dB. O nível de ruído gerado pela via foi estabelecido em 80 dB(A). É importante lembrar que a intenção desses testes foi de analisar o comportamento das curvas de nível de ruído no modelo criado para a situação atual da área em estudo e não de representar a situação real do ruído ambiente no local.

6.4 AJUSTE FINAL DO MODELO

Os ajustes dos parâmetros, identificados nos testes anteriores, foram feitos em um modelo digital simplificado da situação real da área de estudo. O primeiro teste foi feito com

o modelo criado para simulação da área incluindo apenas as curvas de nível do terreno e as dimensões da via de tráfego real. Um segundo teste foi feito inserindo o edifício atual do Departamento de Arquitetura e Urbanismo no modelo anterior. Para esses testes não foram considerados os demais edifícios circundantes, nem as características de tráfego atual da via.

O primeiro teste com modelo simplificado da área de estudo, sem a inserção do edifício atual, não apresentou nenhum comportamento inesperado na apresentação das curvas de propagação dos níveis de ruído. No segundo teste, inserindo o edifício, foi notada uma alteração nas curvas de nível sonoro no espaço interno do edifício estudado. O parâmetro “espaço de grade” foi, então, ajustado para 2 metros e o parâmetro “número de reflexões” foi ajustado para 5. As duas simulações estão mostradas na Figura 40 e Figura 41.

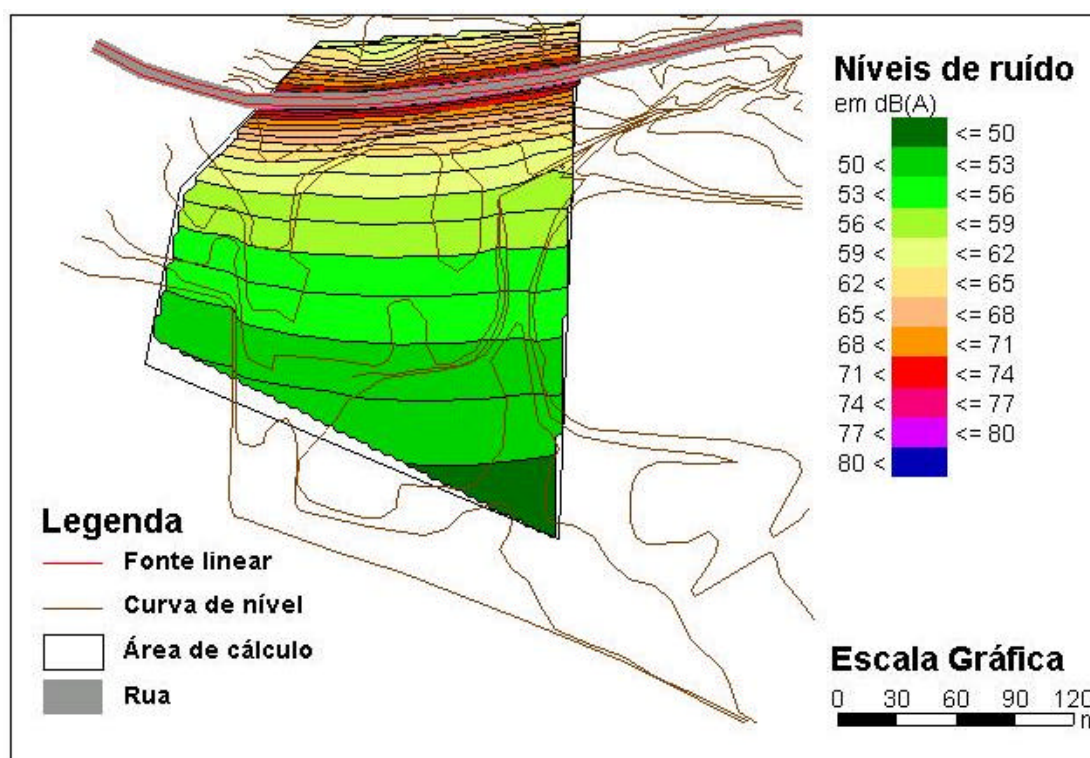


Figura 40 - Resultado do teste com modelo simplificado da área de estudo, sem a inserção do edifício atual.

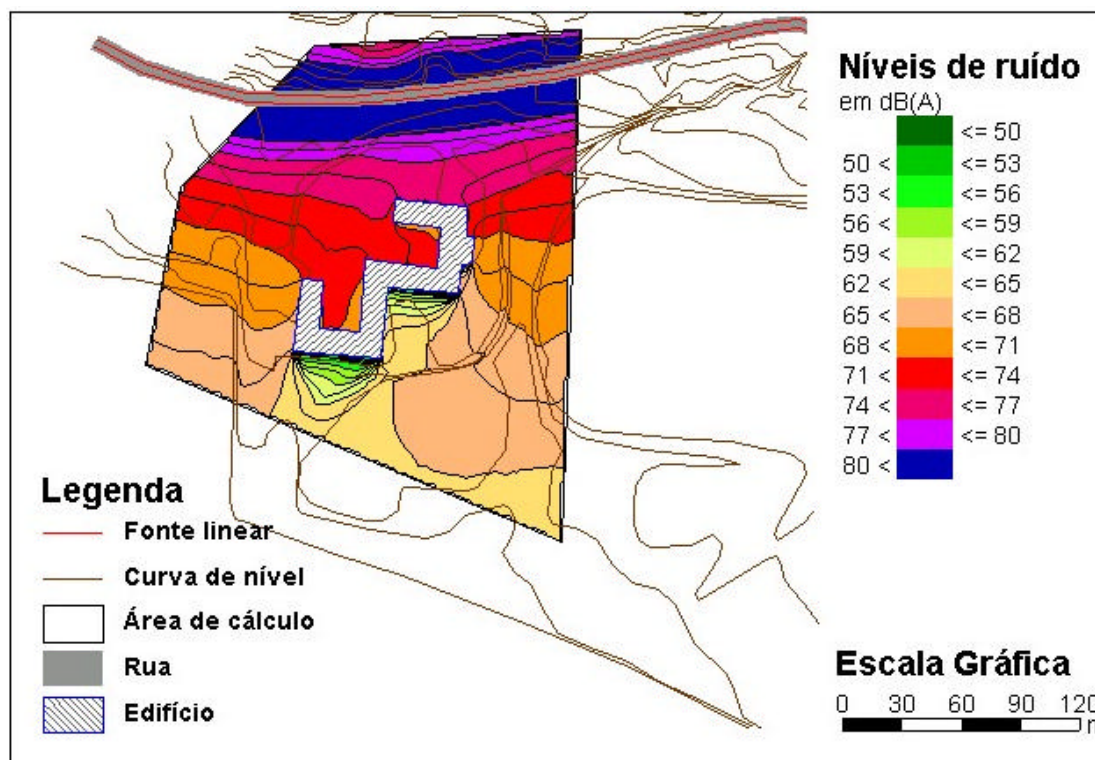


Figura 41 - Resultado teste com modelo simplificado da área de estudo com o edifício atual.

Os testes com o modelo da situação real permitiram estabelecer os valores ideais para os parâmetros relativos à precisão das simulações. As simulações finais serão então realizadas com os valores dos parâmetros: ângulo de incremento = 1, espaço de grade = 2, dimensão de campo = 3x3, min/max = 5, diferença central = 0,5 e número de reflexões = 5.

6.5 AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO X MEDIÇÕES

O grau de confiança das simulações, foi avaliado comparando-se os resultados $Leq(A)$ medidos e as simulações utilizando-se a norma alemã RLS90 para previsão de ruído, aplicada ao modelo criado no programa computacional SoundPLAN®. Foram realizadas quinze medições e quinze simulações para os mesmos pontos, com configurações de tráfego respectivamente iguais. Procurou-se efetuar as medições em configurações de tráfego bastante distintas, no período diurno, independente de dias e horário, procurando representar diferentes situações possíveis.

A Norma Brasileira NBR 10151 (ABNT, 1998) estabelece que o método de avaliação de aceitabilidade do ruído em comunidades deve envolver medições do nível de pressão sonora equivalente, $Leq(A)$. Caso o equipamento não execute medição automática do $Leq(A)$,

deve ser utilizado o procedimento contido no anexo A da mesma norma. Esse anexo apresenta um método alternativo para o cálculo do $L_{eq}(A)$, através da fórmula:

$$L_{Aeq} = 10 \log \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{\frac{L_i}{10}} \quad (15)$$

onde L_i é o nível de pressão sonora, em dB(A), lido em resposta rápida "fast" em intervalos de dez segundos, no mínimo, durante pelo menos cinco minutos, e n é o número total de leituras. Os níveis de ruído em dB(A) foram, então, levantados por amostragem dos valores no medidor de NPS, em intervalos de cinco segundos, durante o período de cinco minutos. O valor de L_{eq} foi obtido através da equação (15). Para estimativa do número total de veículos por hora foi feita a contagem do número de veículos que passaram por um ponto determinado da via, simultaneamente a cada medição efetuada. Para determinar a composição de tráfego, a contagem foi executada discriminando veículos pesados (caminhões e ônibus), leves (automóveis) e motocicletas.

6.5.1 Procedimentos da medição próxima à edificação

Três pontos de medição foram definidos, como mostra a Figura 42, e cinco medições para cada ponto foram realizadas. Em nenhum caso havia qualquer outra superfície ou barreira próxima do ponto de medição ou bloqueando a visibilidade da fonte, além do próprio edifício escolar. A área onde foram executadas as medições é toda gramada, com algumas árvores de pouca folhagem e pequenas pedras. As medições de ruído foram realizadas com velocidade do vento abaixo de 2m/s. As temperaturas registradas nas medições ficaram entre 28,7°C e 30,3°C e não variaram mais que 0,8°C para uma mesma medição. A umidade relativa durante as medições ficou entre 58,9 % e 68,9 % e não variaram mais que 4,7 % para uma mesma medição. Foi utilizado o medidor de nível de pressão sonora Tipo 2, Lutron SL-4001.

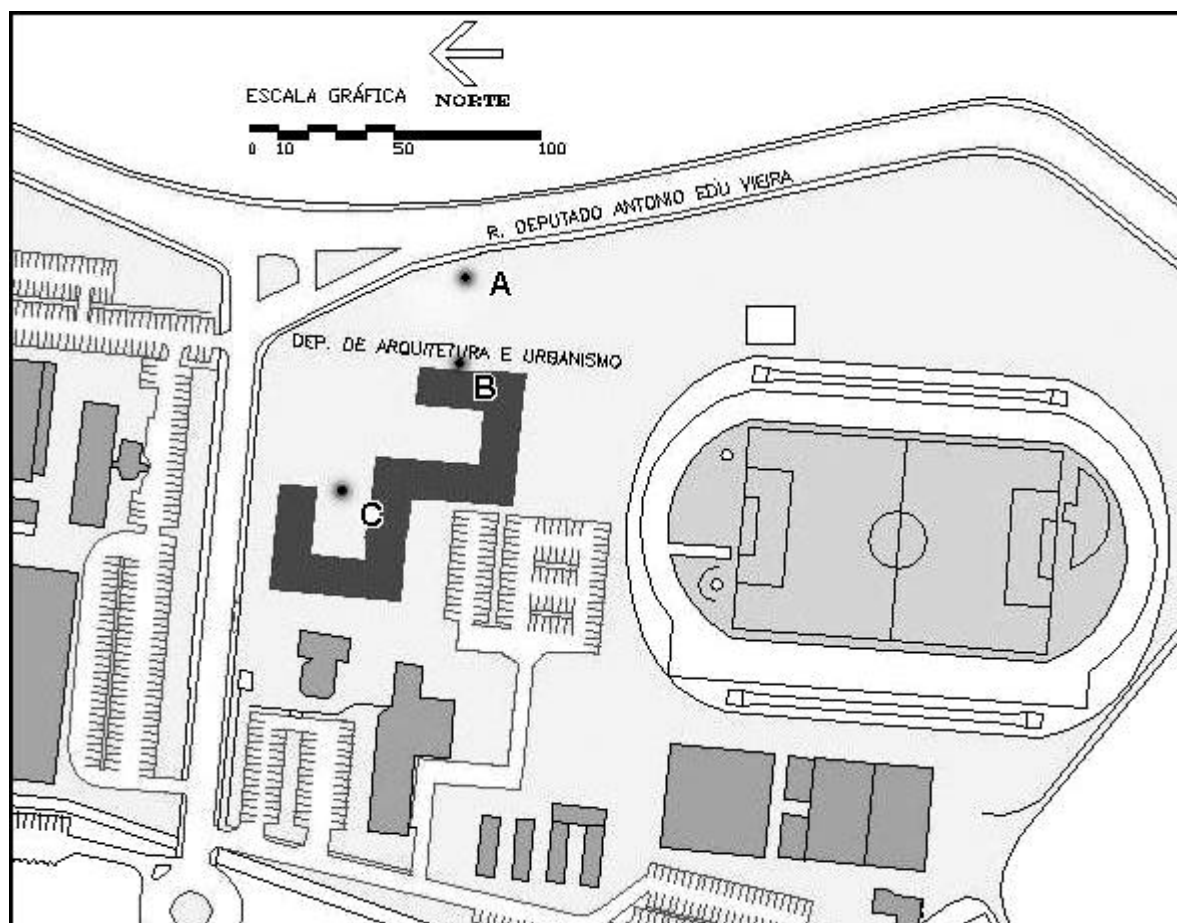


Figura 42 - Planta digitalizada da área com os pontos de medição indicados por A, B e C.

O ponto A foi selecionado a 10m de distância da via, para que pudesse ser feita uma comparação dos valores calculados para a fonte sem a influência dos efeitos de propagação. Os outros dois pontos foram escolhidos de modo que os efeitos do meio de propagação fossem considerados. O ponto B foi locado a distância de 50m da via e a 3m da fachada da edificação mais exposta ao ruído. O ponto C foi locado a cerca de 80 m de distância da via, distante mais de 10m de quaisquer fachadas da edificação.

6.6 COMPARAÇÃO DOS VALORES MEDIDOS COM OS VALORES SIMULADOS

Pode-se separar os parâmetros relevantes para previsão de níveis de ruído de tráfego entre: característica de tráfego, da via e do meio de propagação. Para cada medição realizada as características de tráfego são bastante variáveis, enquanto as outras características não se alteram. O nível de ruído gerado pela fonte linear é calculado pelo programa computacional a partir das características da via e do tráfego: número de veículos por dia, porcentagem de veículos pesados, velocidade máxima permitida, tipo de pavimentação e gradiente da via,

gerando um valor Leq , em dB(A). Por esse motivo, durante cada medição foi efetuada a contagem do número de veículos em trânsito na via, discriminando cada categoria de veículo. A partir desses dados, foi possível estimar o fluxo horário e a composição de tráfego correspondente a cada medição, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Fluxo horário e a composição de tráfego calculados, correspondente a cada medição.

Medições	Posição A		Posição B		Posição C	
	Veículos/hora	% pesados	Veículos/hora	% pesados	Veículos/hora	% pesados
1	1122	5,1	900	2,6	804	11,8
2	1056	7,4	948	7,1	1176	10,9
3	1212	6,5	996	6,7	1464	3,9
4	1116	4,1	1056	8,3	1164	4,9
5	1116	10,6	1320	3,5	1176	6,7

Cada uma das simulações foi, então, efetuada para condições de tráfego equivalentes. Modificando-se as configurações das características de tráfego no modelo simulado, os valores $Leq(A)$ medidos em cada ponto respectivo de medição puderam ser comparados com os níveis de ruído simulados para as mesmas condições de composição e fluxo de veículos. Analisando o coeficiente de correlação e o erro calculados, foi possível avaliar a precisão das simulações dos níveis de ruído no modelo virtual, construído para a situação real do estudo de caso. Com essa avaliação foi possível estabelecer o grau de confiança para as simulações da situação futura para a área de estudo, com a nova via planejada e o novo edifício projetado.

6.6.1 Distribuições Bidimensionais

Foi criado um diagrama de pontos para os valores dos níveis de ruído medidos e os resultados das simulações correspondentes. O diagrama de pontos é um gráfico em que cada par de dados (x_i, y_i) é representado por um ponto de coordenadas (x_i, y_i) , num sistema de eixos coordenados. Esse tipo de representação é muito útil, pois permite realçar algumas propriedades entre os dados, nomeadamente no que diz respeito ao tipo de associação entre os valores x e os valores y . Com a representação em um diagrama de dispersão, a existência de uma certa relação linear entre os fatores x e y que compõem os pares pode ser mostrada. A medida que será utilizada para medir o grau desta associação linear é o coeficiente de correlação linear, que se representa por r e se calcula a partir da equação:

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}} \sqrt{S_{yy}}} \quad (16)$$

onde:

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (17)$$

O valor de r está contido no intervalo $[-1,1]$ e quanto maior for o módulo de r , maior será, o grau de associação linear existente entre os valores de x e os valores de y . Se $r > 0$, significa que a relação entre os valores x e os valores y é do mesmo sentido, isto é, a valores maiores de x correspondem, de um modo geral, a valores maiores de y e vice-versa. Quando $r < 0$, a relação entre os x e os y é de sentido contrário, o que significa que a valores maiores de x , correspondem, de um modo geral, valores menores de y e vice-versa.

6.6.2 Correções aplicadas e erros estimados

Como os valores $Leq(A)$ obtidos foram calculados a partir de amostragem dos valores $dB(A)$, e não automaticamente pelo medidor de nível sonoro, é necessário que correções sejam aplicadas a esses valores, como descrito no Capítulo 4. Através dos diagramas da Figura 10 e da Figura 11, foi definida a correção para os valores em $dB(A)$, obtidos por amostragem de cinco em cinco segundos durante cinco minutos de medição, no período diurno, em relação a uma amostragem contínua com duração de 1 hora. Será aplicada, então, uma correção de cerca de $+1,3$ dB aos valores Leq medidos. O erro estimado para o medidor de NPS Tipo 2 utilizado, segundo classificação da Tabela 6, é de $\pm 1,0$ dB.

6.6.3 Resultado da correlação dos níveis de ruído medidos x níveis de ruído simulados

O gráfico da Figura 43 apresenta os valores medidos e os valores simulados, que constam na Tabela 10, para as mesmas condições de tráfego para cada um dos pontos de medição. Pode-se observar que a diferença entre os valores medidos e simulados foi maior para os pontos de medição mais distantes da via. Esse resultado confirma o comportamento do modelo de cálculo RLS90 verificado por WETZEL et al. (1999), onde foi observada a superestimação do nível de ruído entre $+3$ dB(A) e $+8$ dB(A), para pontos distantes da fonte.

Tabela 10 - Comparação entre os valores Leq(A) medidos, corrigidos em +1,3 dB(A), e os valores simulados para cada uma das posições de medição.

Medições	Posição A			Posição B			Posição C		
	Leq (A)			Leq (A)			Leq (A)		
No.	Medido	simulado	D	medido	simulado	D	medido	simulado	D
1	66,30	65,86	-0,44	59,30	60,64	1,34	55,30	58,54	3,24
2	67,30	66,36	-0,94	57,30	62,84	5,54	55,30	58,03	2,73
3	69,30	67,32	-1,98	57,30	63,17	5,87	53,30	58,87	5,57
4	67,30	67,09	-0,21	60,30	63,08	2,78	54,30	60,43	6,13
5	66,30	68,49	2,19	59,30	64,05	4,75	58,30	59,07	0,77
MÉDIA	67,30	67,02	-0,28	58,70	62,76	4,06	55,30	58,99	3,69

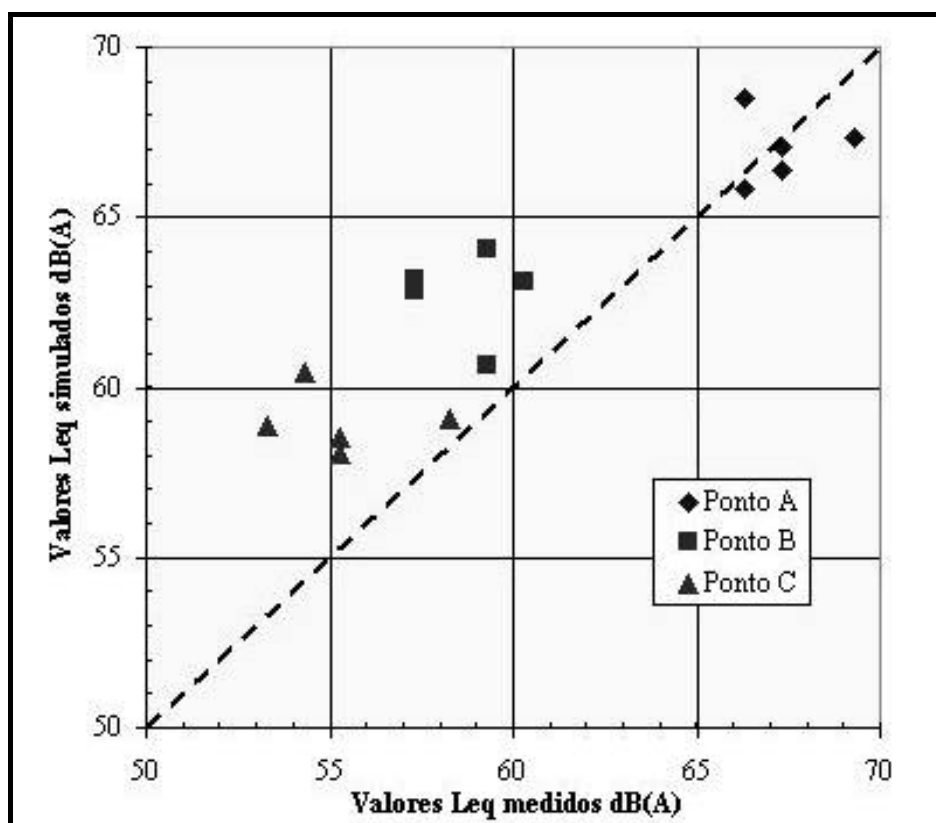


Figura 43 - Diagrama de dispersão Leq simulados x Leq medidos.

No gráfico apresentado na Figura 43, a linha tracejada representa a correlação ideal. Verificando a localização dos pontos na Figura 42, pode-se observar a tendência de superestimação dos valores simulados conforme o ponto de medição se afasta da fonte. Apesar disso, o coeficiente de correlação calculado foi igual a 0,9025, um valor que mostra

uma boa correlação entre os valores medidos e simulados. Esse valor demonstra que, para o cálculo da simulação, as características de tráfego têm uma boa correlação com a variação relativa dos níveis de ruído. Portanto, pode-se afirmar que para o estudo de impacto de ruído, ao modificar as características de tráfego da via em estudo, serão obtidos resultados confiáveis para a estimativa da variação relativa do nível de ruído na área do estudo de caso.

6.6.4 Análise dos valores absolutos e determinação de correções

A partir da análise dos dados apresentados, algumas conclusões podem ser feitas, sobre a viabilidade do uso dos valores absolutos das simulações, para determinação dos níveis de ruído na área em estudo. Para a condição do ponto A, próximo a via e que não considera os efeitos de propagação, a comparação entre as médias mostra um ajuste excelente entre os valores medidos e simulados. Porém, para a condição dos pontos B e C, distantes da via e sujeitos aos efeitos de propagação e da edificação próxima, a comparação das médias do nível de ruído simulado para esses pontos verificou que as simulações apresentam uma superestimação média de +4 dB(A) para os pontos próximos à edificação, com desvio padrão em torno de ± 2 dB(A). Isso indica que a ação da atenuação na propagação do ruído no local, calculada na simulação, é menor do que na realidade. Essa análise confirma, então, a necessidade da aplicação de uma correção média de -4 dB para os níveis de ruído absolutos previstos pelas simulações, para os pontos mais afastados da via próximos às edificações.

6.7 CONCLUSÕES

A partir das investigações apresentadas neste Capítulo, foi possível ajustar os parâmetros de cálculo do programa computacional. Os testes com o modelo virtual da situação real, mostraram que há um grau de associação linear bastante satisfatório entre medições e simulações, apesar da superestimação dos níveis de ruído para pontos afastados da fonte. A partir desses resultados, pode-se afirmar que o impacto real que mudanças nas características de tráfego da via podem gerar nos níveis de ruído na área em estudo, pode ser previsto com boa confiança. Além disso, foi possível constatar que existe um ótimo ajuste para os valores absolutos simulados do nível sonoro de emissão da via e que uma correção média de -4 dB(A) é recomendável para os valores em pontos distantes da via de tráfego, próximos a edificações.

No próximo Capítulo serão efetuadas as simulações finais na área de estudo, inserindo no modelo digital, o projeto para o novo edifício do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, projetado para o local. Será avaliado, então, o impacto que as mudanças previstas para as características de tráfego na atual via, decorrentes do novo planejamento, poderão gerar nos níveis de ruído na fachada deste edifício.

7 CAPÍTULO - AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE RUÍDO DE TRÁFEGO

Este Capítulo apresenta a avaliação do impacto de ruído de tráfego no estudo de caso. São apresentadas as simulações para verificação do aumento relativo dos níveis de ruído no local de construção do novo edifício projetado para o Departamento de Arquitetura e Urbanismo, antes e depois da ampliação planejada para a Rua Deputado Antonio Edu Vieira, principal via no local. Para isto, são levantadas as características do projeto do novo edifício e sua situação de implantação no terreno e, também, estimadas as características de tráfego da via, para a situação atual e para a situação após sua ampliação. Os resultados dessas duas simulações são comparados para avaliação do impacto de ruído e seu efeito junto às salas de aula do edifício. Ao final é feita uma análise dos níveis de ruído absolutos aos quais as salas de aula do edifício estarão expostas, com a futura situação urbana.

7.1 O NOVO EDIFÍCIO PARA O DEPARTAMENTO DE ARQUITETURA E URBANISMO DA UFSC

Plantas digitalizadas detalhadas foram fornecidas pelos arquitetos autores do projeto (MENDES et al., 2001). A partir dessas plantas, foi possível modelar digitalmente o novo edifício do Departamento de Arquitetura e Urbanismo. Devido à complexidade formal do edifício e às limitações do programa, foram necessárias simplificações na sua volumetria, além de ser necessário a separação do edifício em blocos para melhor modelagem das suas dimensões. Segundo o anteprojeto arquitetônico apresentado, o novo edifício terá catorze ateliês, quatro salas de aula expositivas, quinze laboratórios, uma oficina de materiais, estruturas e canteiro coberto, uma oficina de modelos e maquetes, uma biblioteca e um auditório. A implantação da nova edificação ocorre no mesmo terreno onde se encontra a edificação escolar atual, como mostrado na planta apresentada na Figura 44. O projeto prevê dois blocos de edifícios, um interno ao outro, de três andares cada. A ligação entre os prédios é feita através de passarelas suspensas cruzando o pátio interno criado pelo espaço entre os dois volumes. A ligação entre as salas acontece por passarelas voltadas para esse pátio

interno, que possui cobertura apenas em sua área mais central. O estacionamento está distribuído em torno à edificação.

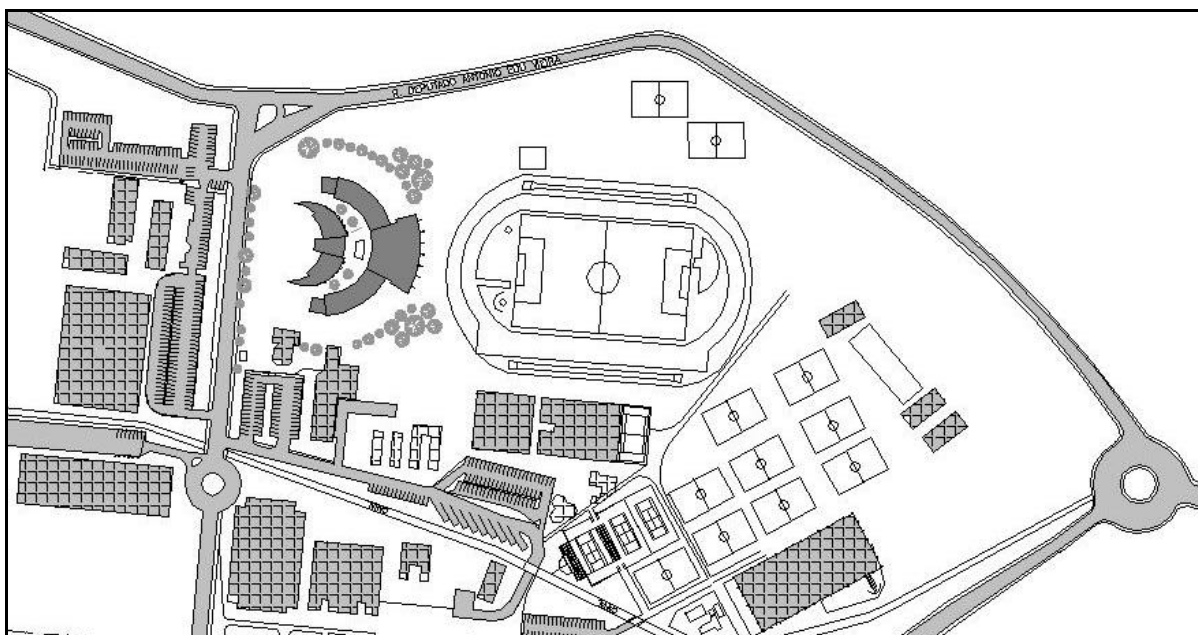


Figura 44 - Planta de situação da área de estudo com a nova edificação.

O edifício menor, em forma de lua, está ocupado pelos setores administrativo e de apoio. A entrada principal é feita por uma praça frontal ao edifício. As salas de professores, salas de trabalho em grupo e reuniões e setor administrativo distribuem-se no 1º, 2º e 3º pisos. No térreo, voltados para o pátio interno, localizam-se lanchonete, livraria, papelaria e escritório piloto. O edifício maior concentra os espaços destinados às atividades didáticas. Esse volume divide-se em um setor central, e duas alas laterais simétricas. No centro localizam-se oficinas, almoxarifado, salas de apoio às oficinas e salas dos laboratoristas, distribuídos no térreo e 1º piso, e biblioteca no 2º e 3º pisos. Nas alas laterais distribuem-se salas de aula, ateliês e laboratórios de pesquisa. O projeto prevê estrutura e laje pré-moldadas em concreto armado, com divisórias móveis entre as salas, paredes exteriores em alvenaria e cobertura com estrutura tubular em aço. Estão previstas, ainda, esquadrias de alumínio com vidro simples, com abertura no eixo horizontal, clarabóias em policarbonato alveolar para iluminação zenital e brises em alumínio para proteção solar.

A Figura 45 apresenta dois cortes gráficos do projeto arquitetônico (MENDES et al., 2001). Através dessas representações é possível visualizar a relação entre os dois blocos pelo pátio interno, as circulações verticais e a disposição das salas de aula no edifício externo.

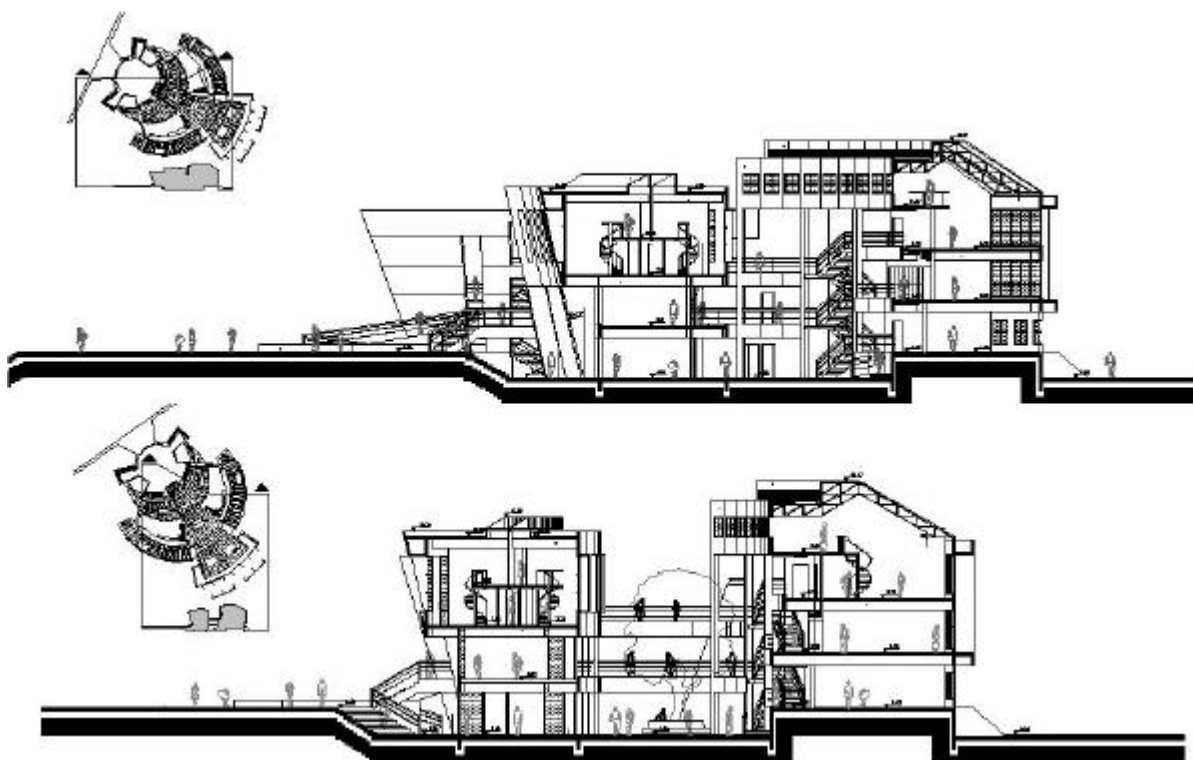


Figura 45 - Cortes gráficos do projeto de arquitetura para o novo Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC (MENDES et al., 2001).

A análise de dados, ainda nessa fase de anteprojeto, já pode indicar ações simples que podem ser tomadas, para que problemas com nível de ruído inadequado às atividades desenvolvidas sejam minimizados. Considerando as principais fontes de ruído externo no local, a implantação do edifício deve ser feita distribuindo os setores com as atividades que exigem silêncio de forma que essas atividades fiquem protegidas do ruído, por exemplo, prevendo elementos para barreira acústica. Conjuntamente, deve-se distribuir os diferentes setores no edifício para evitar conflitos entre exigências acústicas de diferentes atividades desenvolvidas, localizando, por exemplo, os setores com atividades ruidosas em uma edificação diferente da de setores com atividades que exigem silêncio. Além disso, deve-se ter atenção rigorosa para a necessidade da performance de isolamento acústico de paredes, janelas ou portas em relação ao ruído externo ou provindos de salas adjacentes.

7.2 CARACTERÍSTICAS DE TRÁFEGO DA VIA EM ESTUDO ATUAL

Conforme descrito no item 5.3.1, o método de cálculo RLS90 utilizado estima os níveis de ruído emitidos por uma via de tráfego a partir de informações do fluxo de veículos por hora, da porcentagem de veículos pesados em relação ao total de veículos em trânsito e da

velocidade de tráfego máxima permitida na via. A divisão de transportes do Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis (IPUF, 2001) forneceu um levantamento de dados da média diária anual de veículos por categoria para Rua Deputado Antonio Edu Vieira, para o ano de 1997, a saber: 12334 carros, 274 ônibus e 608 caminhões. O Instituto acompanha crescimento do tráfego e estima um aumento igual a 2% ao ano no número de veículos em trânsito, sendo que 80% desse tráfego ocorre de 7:00h às 18:00h. Com esses dados, foi calculado para este período o fluxo diário de 10680 carros, 237 ônibus e 526 caminhões, para o ano de 2001. A partir desses dados levantados, foi estimado que o fluxo de veículos médio horário para via atual é de 1140 veículos com 6% de veículos pesados (ônibus e caminhões). Esses foram, então, os dados utilizados para o cálculo do ruído gerado pela via de tráfego atual nas simulações. Em adição, foi constatado que as contagens de veículos, feitas durante as medições efetuadas no Capítulo 6, apresentaram resultados que se situam em torno desses valores estimados. A velocidade utilizada para o cálculo foi equivalente ao limite de velocidade permitida, igual a 60 km/h, tanto para carros leves como para veículos pesados.

7.3 SIMULAÇÃO DO NOVO EDIFÍCIO COM A VIA DE TRÁFEGO ATUAL

Primeiramente, utilizando o modelo digital para a área de estudo criado e testado no Capítulo 6, foi efetuada a simulação dos níveis de ruído gerados pela via atual, substituindo o modelo digital do edifício atual pelo do novo edifício. O resultado da simulação executada para a situação com o novo edifício e a via atual, com as características de tráfego estimadas no item 7.2, utilizando a norma RLS90 aplicada ao programa computacional SoundPLAN®, é apresentada no mapa de curvas de nível sonoro da Figura 46.

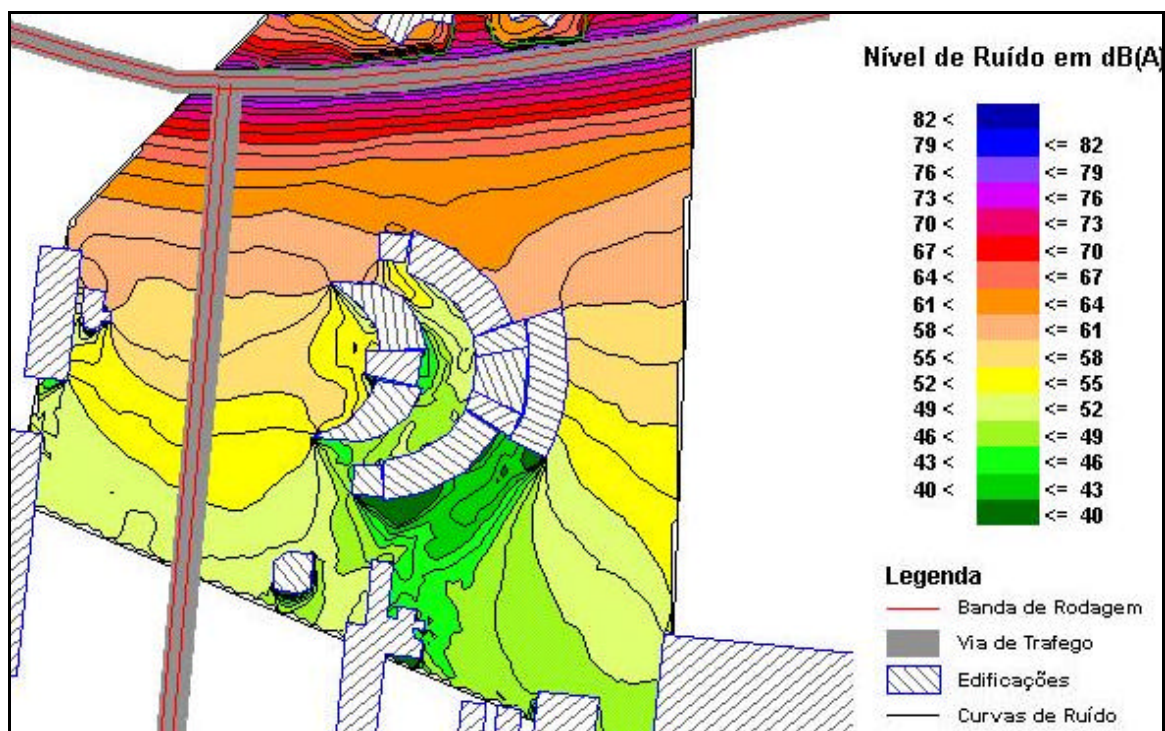


Figura 46 - Resultado da simulação das curvas de nível de ruído na área de estudo com o novo edifício: emissão de ruído da via de tráfego atual.

Na simulação para as condições de tráfego atuais, o Leq calculado para o nível de ruído de emissão da via de tráfego foi de 66 dB(A). Este valor é perfeitamente ajustado ao valor Leq médio de 65,8 dB(A) para a emissão de ruído, apresentado nas medições dos níveis sonoros, em pontos afastados 10m da via, efetuadas no Capítulo 4 para caracterização da via de tráfego. Esse resultado demonstra uma margem de precisão confiável para as simulações nesse tipo de situação.

Através da Figura 46 pode-se observar que a curva de nível sonoro que atinge a fachada mais próxima à via de tráfego apresenta um valor Leq igual a 61 dB(A), enquanto para a fachada oposta, mais protegida do ruído da via, a curva apresenta um valor Leq abaixo de 40 dB(A). Esse resultado demonstra a importância da utilização da geometria e da implantação do edifício para proteção dos setores onde serão desenvolvidas atividades que exigem silêncio, como as salas de aula.

No pátio interno entre os dois blocos as curvas de nível sonoro apresentaram valores Leq entre 46 dB(A) e 55 dB(A). As salas de aula estão localizadas por toda a extensão do edifício maior, com janelas voltadas para a área externa e portas voltadas para esse pátio interno. Pode-se concluir, então, que a variação da exposição aos níveis Leq máximos nas fachadas desse edifício, interna e externa, situa-se entre 46 dB(A) e 61 dB(A). Dessa maneira,

entre a sala de aula mais exposta e a menos exposta ao ruído emitido pela via de tráfego, há uma diferença de 15 dB(A).

7.4 CARACTERÍSTICAS DE TRÁFEGO DA VIA EM ESTUDO FUTURA

A segunda simulação considera , além do modelo digital do projeto arquitetônico que deverá substituir a atual edificação do Departamento de Arquitetura e Urbanismo (MENDES et al., 2001), a situação urbana futura para a área em estudo incluindo, também, a nova configuração para Rua Antônio Edu Vieira, segundo o planejamento apresentado pela prefeitura municipal (FLORIANÓPOLIS, 2001). São modificadas as características físicas da atual via de acordo com o projeto de duplicação e atribuídas as novas características estimadas para o tráfego futuro.

Quando há a intenção de ampliar uma via de tráfego, o objetivo é elevar a capacidade dessa via, muitas vezes alterando sua classificação, modificando seu uso e importância dentro da cidade. Nesse processo, certamente são alterados o fluxo de veículos (número de veículos por hora), a composição do tráfego (porcentagem de veículos pesados) e a velocidade média de tráfego. Através dos dados fornecidos pelo IPUF (2001) apresentados em assembleias convocadas pelo conselho comunitário dos moradores do bairro do Pantanal e através de debates criados em torno desse projeto, junto aos vereadores da Câmara Municipal de Florianópolis e professores dentro da UFSC, principalmente do próprio Departamento de Arquitetura, foi possível antever as futuras características da via de tráfego a ser construída. Esses debates promoveram a conscientização da dimensão do impacto da obra sobre a região e conseguiram que limitações fossem adotadas para o projeto original de expansão.

Segundo o IPUF (2001), a intenção do projeto de ampliação Rua Antônio Edu Vieira é criar uma via arterial de ligação entre a Avenida Costeira da baía sul e os bairros centrais da Ilha, completando o projeto do anel viário Avenida Beira-mar Norte-Sul, como mostra a Figura 47. Entretanto, a discussão promovida pelo Departamento de Arquitetura e Urbanismo, visando criar um debate entre professores de diversas áreas afins sobre as condições que envolvem o projeto urbanístico apresentado pelo IPUF, pôde antever que essa via deverá ser a principal ligação do continente com o norte e o sul da ilha, transformando-se em um corredor de passagem de proporções rodoviárias para veículos de turismo, coletivos (ônibus) e de bens de consumo (caminhões e cargas).

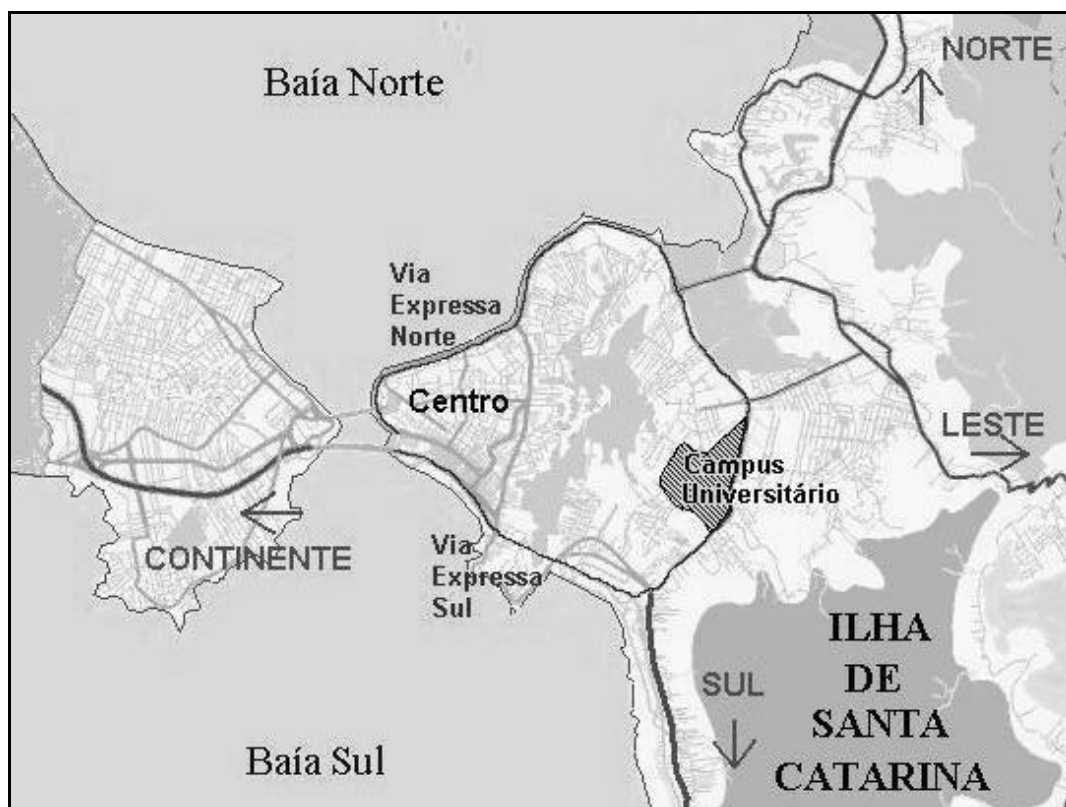


Figura 47 - Mapa da região central da ilha indicando as principais vias de tráfego.

Atualmente, a Rua Deputado Antonio Edu Vieira serve ao bairro do Pantanal fazendo a ligação da Avenida Beira-mar Norte com a Avenida Costeira Sul. A Avenida Beira-mar Norte é uma das principais vias expressas da cidade que liga o centro da cidade e o continente, aos bairros centrais de grande concentração populacional e às principais saídas para as regiões norte e leste da ilha, onde se localizam os bairros de maior interesse turístico da ilha, como Canasvieiras ao norte e a Lagoa da Conceição à leste. A Avenida Costeira Sul é a principal via de ligação do centro da cidade e, conseqüentemente, do continente, com a região sul da ilha, onde se localizam alguns bairros em crescimento como o Campeche e, também, o Aeroporto Internacional Hercílio Luz. Estão sendo concluídas as obras do aterro da baía sul, que prevê uma grande expansão urbana para essa área incluindo uma nova avenida, Beira-mar Sul, para ampliar a capacidade de tráfego na área, como mostra o mapa da Figura 48 e Figura 49.

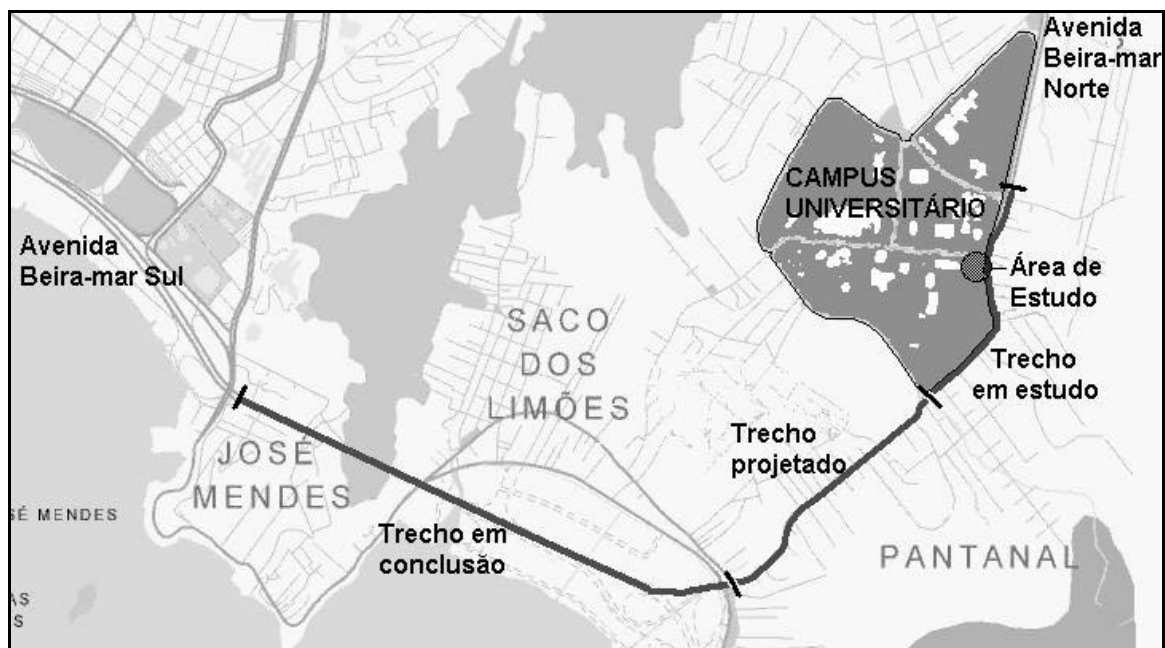


Figura 48 - Projeto do anel viário de ligação Beira-mar Norte – Sul.

Analisando a situação apresentada nos mapas, pode-se concluir que a expansão planejada para a via de estudo, Rua Antônio Edu Vieira, tem interesse, num primeiro momento, em criar uma ligação direta entre as regiões norte e sul da ilha, mas, principalmente em criar, futuramente, uma ligação alternativa entre o continente e a região norte e leste da ilha, redirecionando todo o trânsito de turistas e bens de consumo com destino a essas regiões, que atualmente utilizam a Avenida Beira-mar Norte, para a nova Avenida Beira-mar Sul e, conseqüentemente, para a nova Rua Deputado Antonio Edu Viera ampliada.



Figura 49 – Mapa da Ilha de Santa Catarina indicando as principais vias de acesso rodoviário.

A ampliação da via em estudo faz parte, então, de um planejamento de expansão de escala municipal e não uma simples melhoria da infra-estrutura no bairro onde esta se localiza. Dessa forma, é possível antever que o trecho da Rua Deputado Antonio Edu Vieira, às margens dos edifícios do campus universitário, terá a característica de tráfego equivalente a atual Avenida Beira-mar Norte. Portanto, pode-se concluir que o planejamento urbano para a área em estudo promoverá uma mudança nas características do tráfego de veículos da via marginal ao campus universitário, podendo criar uma degradação significativa na qualidade de vida dos moradores do bairro e, também, na qualidade do ensino nas salas de aula da UFSC, caso não sejam tomadas ações para impedir o impacto ambiental causado pela ampliação da nova via, inclusive dos níveis de ruído gerados, de forma que sejam asseguradas as qualidades adequadas para as atividades desenvolvidas no local.

A partir dessa análise, as características do tráfego da nova via foram estimadas com base no levantamento fornecido pela divisão de transportes do IPUF (2001) para a média diária anual de veículos por categoria para a Avenida Beira-Mar Norte no ano de 1997, a saber: 19666 carros, 346 ônibus e 386 caminhões. Considerando um crescimento do tráfego igual a 2% ao ano, com 80% deste ocorrendo durante o período de 7:00h às 18:00h, calcula-se que o tráfego diário na nova via, para esse período, no ano de 2001, seja de: 42176 carros, 847 ônibus e 832 caminhões. Com esses dados, calcula-se que o fluxo médio horário estimado

para situação de tráfego na nova via projetada é igual a 3983 veículos com 3,8% de veículos pesados. A velocidade estimada, equivalente ao limite de velocidade permitida para a Avenida Beira-mar Norte, é igual a 80 km/h tanto para carros leves quanto para veículos pesados. Esses foram, então, os dados utilizados nas simulações para o cálculo do ruído gerado pela via de tráfego na situação urbana futura.

As modificações no modelo digital criado para o trecho da via em estudo seguiram os padrões definidos pelo projeto aprovado na Câmara Municipal de Florianópolis (FLORIANÓPOLIS, 2001), que prevê a primeira parte da duplicação da via de estudo, num trecho que ainda não chega até o terreno do campus da UFSC, como indicado na Figura 48. O projeto prevê uma faixa de domínio de 30m de largura, com duas pistas de rolamento com 8m de largura, duas faixas para cada direção, separadas por um canteiro de 4m de largura e passeios de 3m em cada margem da via e, ainda, uma ciclovia com 4m de largura, incluindo canteiro. A futura situação urbana para a área, com novo edifício e nova via duplicada de acordo com o projeto, é apresentada na Figura 50.

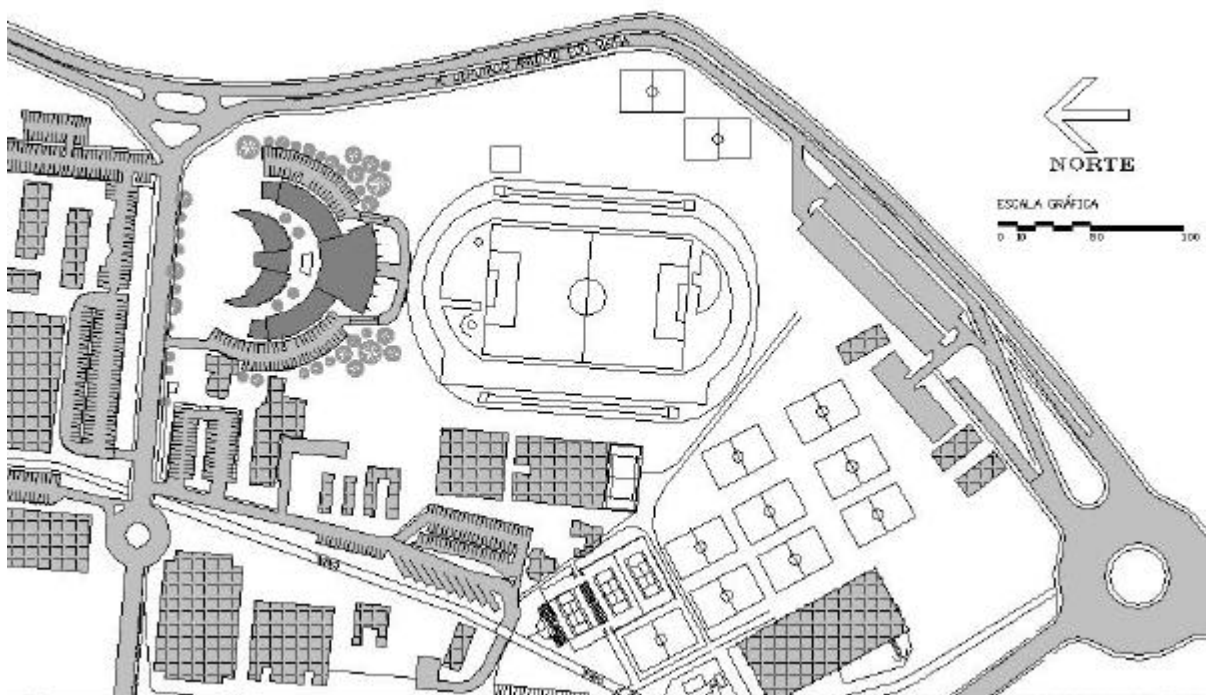


Figura 50 - Situação urbana futura da área em estudo, novo edifício e nova via duplicada.

7.5 SIMULAÇÃO DO NOVO EDIFÍCIO COM A VIA DE TRÁFEGO FUTURA

Nessa simulação são avaliados os níveis de ruído na situação urbana futura do estudo de caso. A simulação utiliza o mesmo modelo digital construído para a área em estudo da primeira simulação, inserindo nesse o novo edifício projetado para o Departamento de Arquitetura e Urbanismo e o novo projeto de ampliação da Rua deputado Antonio Edu Vieira, com as características de tráfego previstas de acordo com as informações apresentadas no item 7.4. Não foi considerada nenhuma modificação para as edificações no entorno do edifício estudado, nem nas vias secundárias ou estacionamentos próximos. Os resultados da simulação para a situação com o novo edifício e a via futura, utilizando o método de cálculo RLS90 aplicado ao programa computacional SoundPLAN®, estão apresentados no mapa de curvas de nível sonoro na Figura 51.

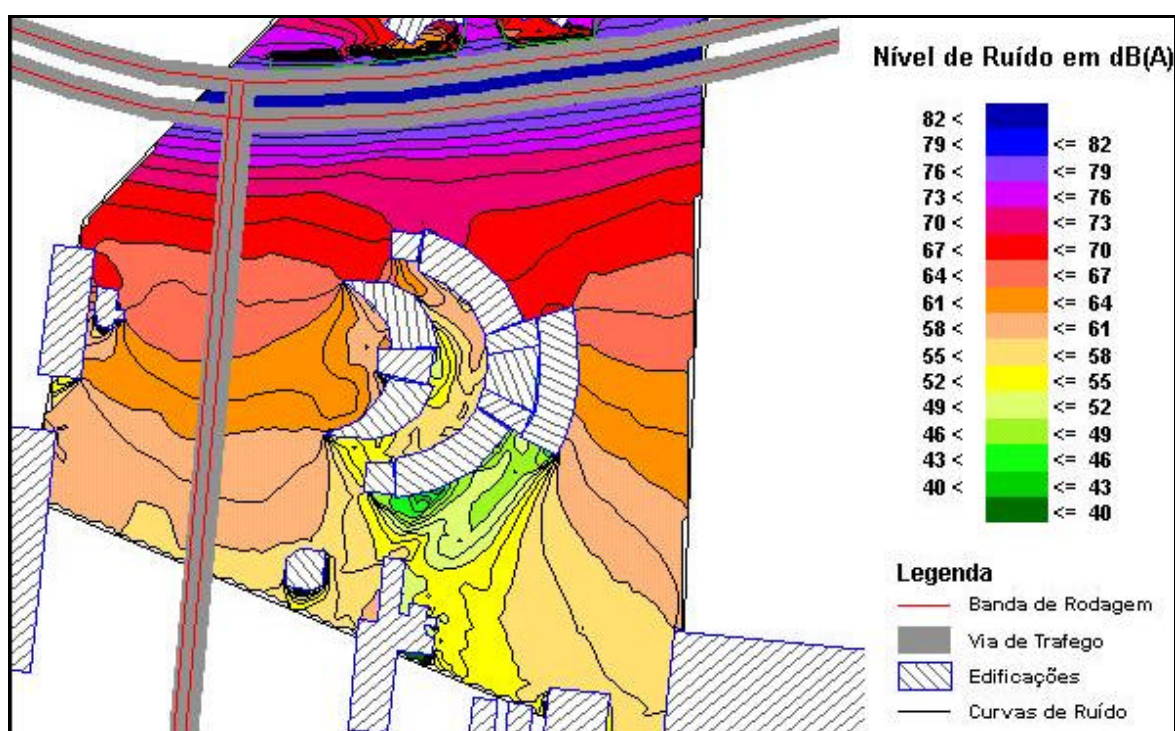


Figura 51 - Resultado da simulação das curvas de nível de ruído na área de estudo com o novo edifício: emissão de ruído da via de tráfego futura.

Nessa simulação, o Leq calculado para o nível de ruído de emissão da via de tráfego foi de 73 dB(A), um aumento de +7 dB(A) em relação ao resultado da simulação anterior. A curva de nível sonoro que atinge a fachada mais exposta à via de tráfego apresenta Leq igual a 70 dB(A), enquanto a fachada oposta, mais protegida do ruído da via, apresenta valores Leq em torno de 46 dB(A). Estes resultados mostram um aumento de +9 dB(A) para a fachada

mais exposta e de +6 dB(A) para a fachada menos exposta, o que indica maior impacto de ruído nas fachadas mais próximas à via. No pátio interno, adjacente ao edifício das salas de aula, os valores Leq ficaram entre 52 dB(A) e 61 dB(A), um aumento, também, de +6 dB(A) em relação aos resultados da simulação anterior. A variação da exposição aos níveis Leq máximos nas fachadas desse edifício, interna e externa, foi entre 52 dB(A) e 70 dB(A) apresentando, então, uma diferença de +18 dB(A) entre a sala de aula mais exposta e a menos exposta ao ruído emitido pela via de tráfego. A Tabela 11 apresenta um resumo desses resultados, com os valores dos níveis de ruído nos pontos mais relevantes para o estudo de impacto. A seguir são analisadas as implicações desses resultados.

Tabela 11 - Resultado dos níveis de ruído Leq simulados para estudo do impacto na área.

Resultados dos valores simulados	Situação atual	Situação futura	Diferença D
Leq de emissão da via de tráfego	66 dB(A)	73 dB(A)	7 dB(A)
Leq na fachada mais exposta	61 dB(A)	70 dB(A)	9 dB(A)
Leq na fachada mais protegida	40 dB(A)	46 dB(A)	6 dB(A)
Leq no pátio interno	46 a 55 dB(A)	52 a 61 dB(A)	6 dB(A)

7.6 O IMPACTO DE RUÍDO DE TRÁFEGO NA EDIFICAÇÃO ESCOLAR

Para análise do impacto de ruído que as modificações nas características de tráfego da Rua Deputado Antonio Edu Vieira poderão gerar na área de estudo, foi feita a comparação entre os resultados apresentados nas duas simulações efetuadas. Da análise dos resultados observa-se um aumento de 7 dB(A) para o nível do ruído de emissão da via de tráfego, o que demonstra um aumento de cinco vezes na energia sonora emitida pela fonte, devido às mudanças nas características de tráfego. As simulações mostram, também, um aumento de 6 dB(A) para os níveis de ruído na fachada mais protegida e de até 9 dB(A) para a fachada mais exposta ao ruído da via de tráfego. Isso implica um aumento de até duas vezes na audibilidade do ruído pelas pessoas (BURNS, 1973), conseqüentemente, numa sensível diminuição na qualidade acústica no local. O aumento médio de 6 dB(A) nos níveis de ruído na área do pátio interno, adjacente ao edifício das salas de aula, também traz efeitos negativos. As circulações que levam às salas de aula se localizam voltadas para esse pátio, logo, o aumento do ruído no pátio interno, além do efeito direto, faz com que se eleve o nível sonoro de conversas de

pessoas no pátio e nas circulações causando, conseqüentemente, aumento no ruído interferente às atividades de aula. A variação de até 18 dB(A), verificada entre os maiores e menores níveis de ruído aos quais diferentes salas de aula estarão expostas mostra que, sem isolamento sonoro adequado para as salas de aula, haverá uma diferença bastante grande na performance das aulas em relação à inteligibilidade da fala.

7.6.1 Aplicação dos resultados em valores absolutos da simulação

Pode-se utilizar os valores estimados para o ruído na fachada da edificação para prever o ruído interno às salas de aula, visto que as janelas estarão expostas diretamente a esse ruído. Aplicando a correção média de -4 dB(A), apresentada no Capítulo 6, ao valor de 70 dB(A) estimado para a fachada mais exposta ao ruído provindo da via, apresentado na simulação da situação com as características da via de tráfego futuras, chega-se ao resultado de 66 dB(A) para uma situação real futura.

A norma NBR 10151 indica, para a estimativa do ruído em ambientes internos de edificações, uma correção de -10 dB(A) para janelas abertas e -15 dB(A) para janelas fechadas. Dessa forma, o valor Leq estimado internamente às salas de aula mais expostas é de 56 dB(A) para janelas abertas e 51 dB(A) para janelas fechadas. Levando em conta que o clima predominante em Florianópolis é quente, e no caso do projeto para o edifício não prever um sistema de climatização para as salas de aula, deduz-se que na maior parte do tempo as janelas deverão ficar abertas, portanto, o valor Leq estimado para o ruído causado pela via de tráfego dentro das salas de aula mais expostas deve ser de 56 dB(A).

Consultando as recomendações nacionais e internacionais para qualidade acústica em salas de aula, apresentadas no Capítulo 3, pode-se afirmar que os valores Leq dentro de sala de aula poderão atingir níveis até +11 dB(A) acima dos recomendados para inteligibilidade e concentração dos alunos. Esse resultado mostra que o impacto do ruído na área de estudo, além de piorar a qualidade relativa ao nível de ruído ambiental Leq na área, ainda irá degradar a qualidade de ensino dentro das salas de aula no edifício estudado e, certamente, também nos outros edifícios do campus que estejam localizados ao longo da via em estudo. Portanto, o planejamento urbano previsto para a área em estudo, deve considerar em seu projeto as ações necessárias para evitar o impacto do ruído gerado pela ampliação da Rua Antonio Edu Vieira nas áreas próximas à via, além de avaliar o custo social dessa intervenção para os usuários e moradores do local para estabelecer, inclusive, as indenizações necessárias.

No Capítulo 8 são abordadas as ferramentas de planejamento urbano existentes atualmente e algumas regulamentações nacionais e internacionais. São propostas, então, diretrizes para a elaboração de uma regulamentação para o planejamento urbano visando evitar conflitos entre diferentes atividades, em relação às suas exigências acústicas, dando ênfase à importância de tal regulamentação para a qualidade acústica das áreas urbanas, principalmente àquelas destinadas a implantação de edificações educacionais.

8 CAPÍTULO - REGULAMENTAÇÃO PARA PLANEJAMENTO DO RUÍDO URBANO

Neste Capítulo são apresentadas questões sobre o planejamento urbano e projeto arquitetônico, visando sugerir ações para minimizar o conflito entre o ruído gerado por vias de tráfego e as exigências acústicas das atividades desenvolvidas em edificações escolares. Através dessas sugestões, é possível criarem-se bases para o desenvolvimento de regulamentações para o planejamento do ruído urbano em áreas destinadas à implantação de edificações escolares.

Ações para controle do ruído no espaço urbano podem ser divididas em intervenções administrativas (restrições de operação da fonte e monitoramento de limites de ruído), soluções de engenharia (controle da emissão pela fonte, construção de barreiras e redirecionamento do tráfego), planejamento urbano (zoneamento, controle de compatibilidade de usos e planejamento para implantação das vias de tráfego) e projeto de arquitetura (planejamento da implantação do edifício, elaboração da forma, planejamento dos setores internos, especificação de acabamentos e aprimoramento do isolamento do edifício) (IOA, 1996). O arquiteto, como agente fundamental no processo de desenvolvimento da cidade e suas edificações, deve, portanto, participar conscientemente das ações para controle de ruído, tanto no planejamento urbano, quanto no projeto arquitetônico. Na fase de planejamento urbano, onde são tratadas as relações entre o edifício e o entorno edificado, são tomadas as decisões dentro da escala da cidade. As decisões dentro da escala humana são tomadas na fase de projeto arquitetônico, quando definem-se as relações do edifício com seus usuários internos e externos. Soluções para conforto acústico em edificações são sempre mais efetivas, e mais econômicas, quando integradas às fases de planejamento urbano e ao projeto arquitetônico da edificação. Além disso, e principalmente, soluções na fase de planejamento urbano são capazes de reduzir enormemente os esforços para resolver problemas de conforto acústico no projeto do edifício. Mais especificamente, devem ser criadas regulamentações para o planejamento do ruído urbano em áreas destinadas à implantação de edificações escolares, para que sejam utilizadas como ferramentas para orientar todos os profissionais envolvidos no planejamento e na construção das cidades.

8.1 REGULAMENTAÇÕES PARA PLANEJAMENTO E PROJETO DE EDIFICAÇÕES ESCOLARES

Atualmente existe um esforço internacional (I-INCE TECHNICAL INITIATIVE, 2002) com o objetivo de se desenvolver recomendações para critérios acústicos para salas de aula. Essas recomendações pretendem prover orientações para a acústica de espaços educacionais, para arquitetos e construtores, e dar bases para o desenvolvimento de regulamentações nacionais para projeto e construção de escolas. O Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC toma parte nesta iniciativa e também vem dando subsídios ao comitê internacional.

Uma recente norma elaborada pela AMERICAN NATIONAL STANDARD (2002) estabelece critérios de performance acústica e requerimentos para projeto e também diretrizes para construções novas ou reformas de espaços escolares, visando garantir a qualidade acústica necessária. Essa regulamentação estabelece, entre outras exigências, padrões do isolamento acústico das construções dependendo dos limites máximos para o nível de ruído médio anual na área de implantação de edificações escolares. Esses limites são de 65 dB(A) para edificações com método construtivo convencional das paredes externas e 75 dB(A) para edificações com projeto de isolamento sonoro especialmente desenvolvido. Sob nenhuma condição o edifício escolar deverá ser construído em uma área com nível anual médio de ruído acima de 75 dB(A). Em conjunto, há limites definidos para o nível de ruído ambiente interno para salas de aula e, especialmente quando o ruído é proveniente de vias de tráfego, deve ser acrescido +5 dB(A) a esses limites. Assim, para 10% da hora mais ruidosa, L10 (1 hora), estabelece-se que os níveis de ruído interno máximos não devem ultrapassar 40 dB(A) para salas até 566 m³ e 45 dB(A) para salas maiores que 566 m³. Esses limites se aplicam para a hora considerada mais ruidosa no local no período de funcionamento das aulas, com atividades cotidianas tanto dentro quanto fora do edifício e sistemas de climatização em funcionamento, porém, para salas vazias e equipamentos de ensino desligados.

A norma brasileira NBR 10152 (ABNT, 2000) determina procedimentos de medição para a avaliação da aceitabilidade do ruído ambiente num determinado recinto de uma edificação. Essa norma estabelece, para salas de aula, laboratórios e bibliotecas, níveis sonoros máximos entre 35 dB(A) e 45 dB(A), como apresentado no Capítulo 3. Para avaliação do nível de ruído interno desses ambientes a partir do nível de ruído externo, a

norma NBR 10151 (ABNT, 1998) define a aplicação de uma correção de -10 dB(A) para janelas abertas e de -15 dB(A) para janelas fechadas. Apesar disso, essa norma não especifica nenhum nível de ruído máximo para as áreas externas onde existam edificações escolares.

8.2 REGULAMENTAÇÕES PARA CONFORTO ACÚSTICO NO AMBIENTE URBANO

Já em 1966 foi estabelecido pelo *Greater London Council Policy Regarding Traffic Noise*, no Reino Unido, que deveria ser considerado o problema do ruído no planejamento de todas as vias de tráfego principais, que recomendações para o nível de ruído em áreas internas dos edifícios deveriam ser observadas e, também, como parte da política de planejamento urbano, o crescimento ao longo de vias de tráfego intenso deveria ser controlado. O governo britânico foi encarregado de adotar normas para regulamentação do ruído gerado pelos veículos automotores e intensificar pesquisas para uma redução substancial do ruído. Em conjunto, deveriam ser criadas legislações mais eficientes para executar as normas reconhecendo, para fins de concessão das obras, despesas inevitáveis para lidar com o ruído, além dos problemas de ordem social, quando novas vias são introduzidas em áreas urbanas silenciosas. Da mesma forma, as autoridades municipais foram orientadas para que o controle do ruído de tráfego, em projeto e implantação de edifícios, fosse considerado e que o crescimento ao longo de rotas de tráfego intenso fosse desencorajado (STEPHENSON e VULKAN, 1968).

No Brasil estão estabelecidos alguns instrumentos que podem ser utilizados para o controle do ruído urbano, entre eles: zoneamento ambiental (instrumento conferido ao município para fazer o zoneamento da cidade), Estudo Prévio de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), Relatório de Impacto de Vizinhança (RIVI), além de critérios utilizados para o licenciamento de uma atividade e monitoramento ambiental, dentre outros instrumentos jurisdicionais de proteção ao meio ambiente. Dentro dessa perspectiva, a Resolução n. 2/90 criou o Programa Nacional de Educação e Controle de Poluição Sonora, coordenado pelo IBAMA, que conta com a participação de ministérios do poder executivo, órgãos estaduais e municipais do meio ambiente e demais entidades interessadas (FIORILLO, 2001).

Na execução da política urbana de que tratam os artigos 182 e 183 da Constituição Federal, está definido que deve ser aplicado o previsto na Lei Federal nº 10257, denominada Estatuto da Cidade, onde se estabelecem normas de ordem pública e interesse social que

regulam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem-estar dos cidadãos, bem como do equilíbrio ambiental (BRASIL, 2001). O Capítulo I do Estatuto da Cidade, estabelece que a política urbana tem por objetivo ordenar o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, mediante diretrizes gerais, entre as quais apresentam-se questões ligadas ao planejamento do ruído na cidade, como:

1. Planejamento do desenvolvimento das cidades de modo a evitar e corrigir as distorções do crescimento urbano e seus efeitos negativos sobre o meio ambiente;
2. Ordenação e controle do uso do solo, de forma a evitar a utilização inadequada dos imóveis urbanos, a proximidade de usos incompatíveis ou inconvenientes, o parcelamento do solo, a edificação ou o uso excessivo ou inadequado em relação à infra-estrutura urbana, a instalação de empreendimentos ou atividades que possam funcionar como pólos geradores de tráfego sem a previsão da infra-estrutura correspondente, a deterioração das áreas urbanizadas, a poluição e a degradação ambiental;
3. Proteção, preservação e recuperação do meio ambiente natural e construído;

Nesse mesmo Capítulo I do estatuto, são também previstos mecanismos para o planejamento democrático das cidades, como por exemplo a audiência do poder público municipal e da população interessada nos processos de implantação de empreendimentos ou atividades com efeitos potencialmente negativos sobre o meio ambiente natural ou construído, o conforto ou a segurança da população.

Sob essas diretrizes, então, deve ser executado todo o planejamento urbano das cidades, denominado Plano Diretor, envolvendo o macro e o micro-zoneamento. O macro-zoneamento define simplesmente as áreas urbanizáveis e não-urbanizáveis. Com isso é possível assegurar os limites preliminares de urbanização e preservar os elementos naturais essenciais, antes da elaboração de um micro-zoneamento. No micro-zoneamento é, então, efetuada a divisão detalhada da área urbana em diferentes zonas de uso e ocupação do solo, definidas segundo as funções que deverão desempenhar na cidade, tais como habitação, lazer, trabalho, institucional ou circulação. O mecanismo do zoneamento pressupõe uma ordenação do uso do solo urbano segundo as diversas zonas adotadas, considerando a compatibilidade de atividades e usos dessas áreas. Para tal fim, define-se a adequação dos usos às zonas segundo a sua espécie, porte e periculosidade (FLORIANÓPOLIS, 1998). A espécie dos usos do solo representa o tipo da atividade exercida. O porte dos usos do solo representa sua dimensão

relativa e está vinculado aos impactos gerados pelo volume da atividade, subdividindo-se em micro, pequeno, médio e grande. A periculosidade dos usos do solo representa o grau em que os mesmos são prejudiciais às pessoas ou às propriedades e deve estar de acordo com o grau de poluição adotado pelos órgãos ambientais estaduais e federais. A definição da compatibilidade dos usos às zonas, então, é feita classificando-os como Adequados (A), Toleráveis (T) ou Proibidos (P), numa avaliação conjunta de sua espécie, porte e periculosidade. A adequação e compatibilidade dos usos às zonas é um dos instrumentos mais importantes para a manutenção da qualidade de vida para os moradores da cidade e, dessa forma, deve ser utilizada, também, para o planejamento do ruído urbano.

Os critérios para aplicação dessas ferramentas de planejamento na avaliação da compatibilidade das necessidades acústicas das diversas atividades desenvolvidas nas cidades, estão definidos na Lei Complementar nº 003 de 05 de julho de 1999 (Florianópolis 1999). Esses aspectos estão relacionados com os critérios abordados nesse trabalho e representam os fundamentos para a criação de uma regulamentação para a efetiva aplicação da metodologia de avaliação de impacto de ruído de vias de tráfego no planejamento urbano.

8.3 PROPOSTA PARA REGULAMENTAÇÃO DO RUÍDO DE VIAS DE TRÁFEGO EM ÁREAS COM ATIVIDADES ESCOLARES

Uma regulamentação para controle do ruído urbano deve determinar os níveis aceitáveis requeridos para diferentes áreas da cidade, determinar os procedimentos para o levantamento do nível de ruído urbano e indicar restrições e ações a serem empregadas para o controle de ruído na fonte e/ou no caminho de propagação.

Primeiramente, uma regulamentação para planejamento do ruído em áreas destinadas a atividades escolares deve apresentar as relações entre os níveis de ruído ambiente nas áreas destinadas à implantação de edificações escolares e o isolamento acústico da edificação. A Tabela 12 mostra, por exemplo, o requerimento da performance de isolamento sonoro de fachadas de edificações escolares em função do nível de ruído externo apresentada na regulamentação alemã (VALLET, 2000). Esses requerimentos poderiam ser aplicados no Brasil como exigência de projeto para autorização da construção de uma escola e também como parte do compromisso da administração pública com a presença de vias de tráfego em áreas escolares.

Tabela 12 - Regulamentação alemã para performance do isolamento acústico de fachadas em escolas dependendo do ruído externo medido (VALLET, 2000).

Nível de ruído externo medido	Isolamento sonoro da fachada
Inferior a 55 dB(A)	30 dB
56 a 60 dB(A)	30 dB
61 a 65 dB(A)	35 dB
66 a 70 dB(A)	40 dB
71 a 75 dB(A)	45 dB
76 a 80 dB(A)	50 dB
Maior que 80 dB(A)	é necessário um estudo especial

A partir de critérios de exigências construtivas em função do ruído ambiente, deve-se estabelecer a compatibilidade da implantação de vias de tráfego para as áreas escolares. Está previsto na Seção VII do Capítulo I do Plano Diretor para a cidade de Florianópolis que a criação, ou dissolução, das Áreas Comunitárias Institucionais (ACI), a qual os equipamentos de educação fazem parte, deve ser feita pelo órgão municipal de planejamento e setores afins, aprovados por lei e que, em todos os casos, devem ser observados os usos das áreas circunvizinhas para que não haja conflito (FLORIANÓPOLIS, 1998 e 1999). Com essas ferramentas, então, é possível haver um planejamento para implantação das vias de tráfego assim como das edificações escolares. Infelizmente, o sistema de adequação de usos apresentado, não inclui a avaliação da implantação de vias de tráfego para verificação dos conflitos, inclusive acústicos, dentro das áreas de zoneamento, a não ser para zonas de proteção ambiental, zonas estas não urbanizáveis.

A organização das vias de tráfego em uma cidade é feita pela classificação da sua função, sendo: vias de circulação e tráfego pesado, vias de penetração, vias de distribuição e vias de acesso. Essas vias são planejadas em função da densidade de população estabelecida para a zona, dos empreendimentos comerciais na área, da capacidade de estacionamento de veículos, etc. Deve-se observar que cada uma dessas classes poderia ser distinguida, também, por sua intensidade sonora e por seu espectro sonoro característico. As vias de penetração rápida e as de circulação e tráfego pesado, por exemplo, deveriam ser consideradas, em relação à geração de ruídos, equivalentes às zonas industriais, visto que os níveis alcançados nelas são, muitas vezes, superiores aos originados pelas indústrias (RELACUS, 2001). A Seção II do Capítulo II do Plano Diretor de Florianópolis prevê que a rede de vias do sistema

rodoviário deve ser hierarquizada de acordo com suas funções, usos e caixa da via, (medida em seção transversal da via incluindo pistas de rolamento), canteiros centrais e passeios. A partir dessa classificação, mostrada esquematicamente na Tabela 13, poderia-se, então, estabelecer a compatibilidade acústica entre cada classe de via e as áreas de uso escolar.

Tabela 13 - Classificação das vias para planejamento urbano (FLORIANÓPOLIS, 1998).

Classificação	Função	Principal uso	Caixa mínima
Vias arteriais	Estruturar o sistema viário	Rodovias para ligação de centros urbanos	38 m
Vias principais	Conciliar o tráfego de passagem com o tráfego local	Proporcionar facilidade para o transporte coletivo	33 m
Vias coletoras	Coletar o tráfego de vias sub-coletoras e locais para as vias principais	Corredores de comércio e serviços dos bairros	27 m
Vias sub-coletoras	Coletar o tráfego de vias locais para as vias coletoras	Apoiar a função comercial das vias coletoras e facilitar o acesso aos bairros	16 m
Vias locais	Demais vias de circulação de veículos	Possibilitar o acesso direto aos lotes e edificações	12 m

Para cada uma das classes de vias de tráfego, seria possível estimar o ruído médio gerado aplicando-se os cálculos de previsão e análises estatísticas de medições, conforme apresentados no Capítulo 4. Dessa forma seria possível estabelecer a compatibilidade de uso entre essas e as outras atividades da cidade, como a atividade escolar, por exemplo.

8.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS PARA UMA REGULAMENTAÇÃO NACIONAL

Uma regulamentação nacional de planejamento urbano, para controle do ruído emitido por vias de tráfego em áreas escolares, deverá definir a metodologia de aplicação de avaliações de impacto de ruído urbano e, também, determinar as ações e restrições visando a compatibilidade dos usos em relação às exigências acústicas de cada atividade. Indicadores para avaliação de ruído de tráfego e parâmetros para qualificação do conforto acústico para atividades escolares, abordadas pelas normas nacionais vigentes NBR 10151 (ABNT, 2000) e NBR 10152 (ABNT, 1998), podem ser utilizados para basear essa regulamentação. Além disso, a partir dessas normas, devem ser definidas exigências de isolamento acústico da edificação em relação aos níveis do ruído ambiental permitido para as áreas externas. Da

mesma forma, é necessário estabelecer limites para o nível de ruído ambiental permitido, para que as atividades externas da escola não sejam prejudicadas. Todo esse planejamento encontra suporte através de simulações para previsão dos níveis de ruído de situações futuras em áreas urbanas, de acordo com o que foi apresentado no Capítulo 5 e Capítulo 6.

Um estudo de impacto do ruído de tráfego em edificações escolares deve ser executado tanto para implantação de uma nova via ou ampliação de uma via existente, quanto para construção de uma nova edificação escolar. Primeiramente, é necessário um levantamento de toda a área urbana em estudo, das características arquitetônicas do edifício e das características de tráfego da via, para a criação dos modelos digitais para execução das simulações gerando-se, como resultado, as curvas de nível sonoro para a área. Deve ser considerada, também, a projeção futura das características de tráfego de veículos da via, assim como quaisquer modificações previstas no entorno urbano ou nos objetos de estudo, o edifício e a via. Tanto no caso de projetos para novas edificações escolares, quanto em projetos de ampliação da capacidade de tráfego de uma via existente ou construção de uma nova via em áreas com edificações escolares, é necessário analisar as prováveis características futuras do tráfego na área de estudo para executarem-se simulações dos futuros níveis de ruído no local. Com isso, é possível então, prever o impacto que as modificações na área acarretarão para os níveis de ruído ambiente. Esse processo é capaz de substituir com boa aproximação o mapeamento sonoro executado a partir de medições do nível de ruído. Além de ser demorado e dispendioso, há dificuldade de se obter dados de monitoramento dos níveis de ruído por um ano todo, para as áreas urbanas no Brasil. Devido a isso, alternativamente, é possível considerar o nível de ruído da via no horário de maior tráfego, dentro do período de atividades de aula.

A partir do resultado das simulações, pode-se determinar a viabilidade das obras, considerando o impacto do nível de ruído de tráfego futuro nas atividades do edifício escolar ou, por outro lado, pode ser estabelecida a necessidade de prover isolamento acústico especial para o edifício ou de criar soluções para reduzir a emissão do ruído pela via. Em consequência, a regulamentação deverá determinar que sejam considerados no orçamento final da obra da via: a avaliação da viabilidade de alcançar os níveis de ruído adequados, o projeto e construção dessas instalações e, também, além do custo financeiro, o eventual prejuízo social da ação e a decorrente indenização pelos danos causados.

9 CAPÍTULO - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa apresentou uma investigação sobre vias de tráfego como fonte de ruído urbano e sua implicação na qualidade acústica para as atividades escolares. Foi dado enfoque para a questão da interferência dos níveis de ruído emitidos pela via na inteligibilidade da fala em salas de aula. Foram levantados os procedimentos e as limitações da análise do ruído de vias de tráfego e do uso de simulações computadorizadas para previsão do impacto no planejamento urbano. A partir das investigações e dos procedimentos desenvolvidos, foram apresentadas diretrizes para a criação de uma regulamentação que oriente projetos urbanos, nos quais profissionais, administradores e sociedade estejam envolvidos para construção de cidades com melhores condições ambientais. As seguintes conclusões podem ser destacadas:

- A inteligibilidade da fala é um dos fatores mais importantes para o bom desempenho das atividades escolares, pois está ligada diretamente com a capacidade de concentração e entendimento da informação oral, questão fundamental no processo de aprendizagem.
- O nível de ruído ambiente é, junto com a reverberação, o parâmetro de maior influência na qualidade da inteligibilidade da fala. O tráfego de veículos automotores, como fonte de ruído intenso mais presente em áreas urbanas é, então, um fator de conflito para alcançar-se a inteligibilidade da fala adequada em salas de aula de edifícios escolares nas cidades.
- Uma avaliação preliminar do impacto dos níveis de ruído em função da implantação de novas vias de tráfego pode ser efetuada pela análise detalhada do projeto da via e da situação urbana no local de implantação. Quando necessário, a caracterização do ruído gerado por uma via de tráfego pode ser executada através de procedimentos e aparelhos simples para medição do nível de ruído urbano, com resultados satisfatórios para avaliação.
- Apesar da complexidade dos fatores que influenciam a emissão, propagação e recepção do ruído gerado por vias de tráfego, os programas computacionais de simulação para avaliação e previsão do ruído de tráfego, disponíveis comercialmente, tal como o utilizado neste trabalho, atendem às necessidades de planejamento urbano e análise do impacto do ruído de tráfego.

- O método de cálculo RLS90, aplicado no programa computacional de simulação de ruído SoundPLAN® permite que uma avaliação detalhada do impacto do ruído de uma via de tráfego seja efetuada com precisão, através da comparação do resultado de simulações, com configurações urbanas diferentes, para a mesma área. O método aplicado apresenta resultados bastante satisfatórios para a previsão da emissão de ruído por uma via, a partir das características da via e dos dados de tráfego. Porém, para a previsão de valores absolutos do nível de ruído, para pontos afastados da via e para pontos próximos à edificações, os resultados podem ser superestimados. Na presente pesquisa foi encontrado uma superestimação na ordem de 4 dB(A).
- O programa computacional utilizado ainda exige um conhecimento técnico considerável para criação dos modelos e manipulação dos parâmetros de cálculo, o que certamente dificulta a disseminação e utilização sistemática dessa ferramenta no planejamento urbano.
- O planejamento urbano e o projeto arquitetônico de edificações, atribuições que competem principalmente ao arquiteto e urbanista, devem incorporar mais profundamente as questões de conforto ambiental, inclusive o acústico. Ações acertadas na fase de planejamento urbano e de implantação, tanto da via de tráfego quanto da edificação escolar, são fundamentais para minimizar o conflito do ruído de tráfego em áreas escolares.
- O planejamento urbano atual no Brasil não considera, na prática, o impacto no ruído ambiente resultado da implantação de vias de tráfego. O estágio atual do conhecimento e das pesquisas sobre ruído gerado por vias de tráfego, assim como seu efeito nas atividades escolares é consistente e, se adaptado à realidade brasileira, permite que legislações sejam criadas para regulamentação da compatibilidade entre esses usos. Baseado em novas iniciativas para promoção do pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e da propriedade urbana, como o Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001), essa abordagem pode ser implantada com emprego de regulamentações específicas.
- Uma regulamentação para avaliação do impacto do ruído de tráfego em áreas escolares pode utilizar-se das normas nacionais para avaliação do ruído, NBR 10151 (ABNT, 1998) e NBR 10152 (ABNT, 2000), e do sistema de compatibilidade de usos existente nos Planos Diretores das cidades, incluindo nesse sistema uma qualificação dos níveis de

ruído para as vias de tráfego em função de sua classificação. Isso pode ser executado através das ferramentas de avaliação de ruído de tráfego e das informações existentes para qualificação do ruído em relação a determinadas atividades.

9.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros recomendam-se:

- Investigar a relação entre as características da via e do fluxo de veículos e o nível de ruído emitido, para a realidade brasileira. As formulações analíticas, derivadas empiricamente, baseiam-se em medições realizadas em outros países cujo tipo de cobertura de pista, idade e condição da frota de veículos, perfil dos motoristas, entre outros aspectos, diferem da situação nacional.
- Avaliar a acústica de salas de aula para formularem-se critérios de qualidade acústica para edificações escolares. Tomando-se novamente o estudo de caso aqui selecionado, poder-se-ia verificar sua validade na garantia do atendimento das necessidades acústicas dos diversos ambientes escolares.
- Investigar alternativas de soluções arquitetônicas que harmonizem os requisitos de conforto acústico com outros aspectos de conforto no ambiente construído como, por exemplo, conforto térmico, lumínico e de ventilação, para o caso específico de edificações escolares.
- Realizar estudos semelhantes a esse para determinar o conflito entre vias de tráfego e outras atividades das cidades, visando levantar diretrizes para a elaboração de regulamentações da mesma natureza.
- Efetuar levantamento mais aprofundado em relação ao incômodo subjetivo que vias de tráfego apresentam para as atividades escolares e suas implicações sociais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIREY, S. A survey of acoustical standards in UK classrooms and their effect on pupils and teachers. In: BUILDING FOR A SOUND EDUCATION, 1998, Londres. *Proceedings of the Institute of Acoustics*, v. 20 (4), 1998. p. 14-21.
- AIREY, S.; MACKENZIE, D. J.; CRAIK, R. J. M. Can you hear me at the back? Effective communication in classrooms. In: 7th INTERNATIONAL CONGRESS ON NOISE AS A PUBLIC HEALTH PROBLEM, 1998, Sydney. *Noise Effects*, v. 1, 1998. p. 195-198.
- AIREY, S.; MACKENZIE, D. J.; CRAIK, R. J. M. The effect of room acoustics on the intelligibility of speech in school classrooms. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 1997, Budapeste. *Proceedings of Inter-noise*, 1997. p. 787-790.
- ALVES FILHO, J. M., *Influência da composição do tráfego sobre o ruído gerado por rodovias*, Florianópolis, 1997. Dissertação de mestrado, Engenharia Mecânica, UFSC.
- AMERICAN SPEECH-LANGUAGE-HEARING ASSOCIATION (ASHA), 37, *suppl. 14, Position statement and guidelines for acoustics in educational settings*, 1995. p. 15-19.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10151:1997*, Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade. Rio de Janeiro, 1998.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10152:1997*, Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro, 2000.
- ASTOLFI, A.; PERINO, M.; PICCALUGA, A procedure to improve speech intelligibility in university classrooms. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- AVSARM, Y.; GONULLU, M.T., A map preparation for outdoor noises of educational buildings in Fatih district of Stanbul. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON NOISE CONTROL & ACOUSTICS FOR EDUCATIONAL BUILDINGS, 2000, Turquia. *Proceed.*, 2000. p. 69-76.
- BERGLUND, B.; LINDVALL, T. (Eds.), *Community noise*. In: WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), v. 2(1). Estocolmo: publicado pela Universidade de Stocolmo & Karolinska Institute, 1995.

- BERGLUND, B.; LINDVALL, T.; SCHWELA, D.H. (Eds.), *Guidelines for community noise*. in: EXPERT TASK FORCE MEETING, Londres. Baseado no documento *Community noise*. In: WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), v. 2(1). Estocolmo: Universidade de Stocolmo & Karolinska Institute, 1995.
- BISTAFA, S. R.; BRADLEY, J. S. Reverberation time and maximum background-noise level for classrooms from a comparative study of speech intelligibility metrics. *Journal of Acoustic Society of America*, v. 107(2), 2000.
- BLOKLAND, G.J. Van; DE GRAAFF, D.F.; REININK, F. Effect of tire noise limits on traffic noise. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 1996, Liverpool. *Proceedings of Inter-noise*, v. 6, p. 3315-3320, 1996.
- BRADLEY J. S.; VASKOR J. G.; DICKINSON S. M. The effect of skewness and standard deviation on sampling errors for traffic noise. *Applied Acoustics* v. 12, p. 397-409, 1979.
- BRADLEY, J. S. Predictors of speech intelligibility in rooms. *Journal of Acoustic Society of America*, v. 80 (3), p. 837-845, 1986(a).
- BRADLEY, J. S. Speech intelligibility studies in classrooms. *Journal of Acoustic Society of America*, v. 80 (3), p. 846-854, 1986(b).
- BRADLEY, J.S. Building Research Note (BRN) 239. *Uniform derivation of optimum conditions for speech in rooms*. Canadá: National Research Council of Canada, 1985.
- BRADLEY, J.S.; REICH, R.D.; NORCROSS, S.G. On the combined aspects of signal-to-ratio and room acoustics on speech intelligibility. *Journ. of Acoustic Society of America*, v. 106 (4), 1999.
- BRASIL, Estatuto da cidade, Lei Federal Nº 10.257 de 10 de julho, 2001. Regulamenta os artigos 182 e 183 da Constituição Federal e estabelecem diretrizes gerais da política urbana. Diário Oficial da União, Brasília, 10 jul. 2001.
- BRAUNSTEIN + BERNDT GmbH, *SoundPLAN home page*. Disponível em: <<http://www.soundplan.com>>. Acesso em: dez. 2001.
- BRAUNSTEIN + BERNDT GmbH. *Instalação e manual do programa computacional SoundPLAN 5.0, HL 2784*. mai. 2000. 1 CD ROM.

- BROOKS, B. M.; DUBOIS T. J.; LUBBMAN, D.; NIXON, M. T.; PEARSONS, K. S.; SCHAFER, M. E.; SOLI, S.D.; SUTHERLAND, L.C. Need and issues for american standards and guidelines for classroom acoustics. In: 7th INTERNATIONAL CONGRESS ON NOISE AS A PUBLIC HEALTH PROBLEM, 1998, Sydney. *Noise Effects*, v. 1, 1998. p. 191-194.
- BRÜEL & KJÆR, *Environmental noise booklet*. Brüel & Kjær Sound & Vibration Measurement A/S, 2000. Disponível em: <<http://www.nonoise.org/library/envnoise/>>. Acesso em: dez. 2001.
- BUILDING BULLETIN. *BB 51, Acoustics in education buildings*, Department of Education and Science, United Kingdom, 1975.
- BURNS, W. *Noise and man*. 1. ed. Londres: J. Murray, 1973.
- CARIC, I.; CUDINA, M. Disturbing effects of noise in classroom of a primary school. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- CELIK, E.; KARABIBER, Z. A pilot study on the ratio of schools and students affected from noise. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON NOISE CONTROL & ACOUSTICS FOR EDUCATIONAL BUILDINGS, 2000, Turquia. *Proceedings*, 2000. p. 119-128.
- COFFEEN, B.; SEEP, B.; GLOSEMEYER, R.; HULCE, E.; LINN, M.; AYTAR, P. Classroom acoustics. In: TECHNICAL COMMITTEE ON ARCHITECTURAL ACOUSTICS OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 2000. Architectural Engineering Program, University of Kansas, 2000.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA nº 001 de 23 de janeiro de 1986. Diário Oficial da União, Brasília, 17 jan. 1986.
- DOCKRELL, J.; TACHMATZIDIS, I.; SHIELD, B.; JEFFERY, R. Children's perception of noise in schools. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- DODD, G., WILSON, O., VALENTINE, J., HALSTEAD, M. MCGUNNIGLE, K., Classroom acoustics - a New Zealand perspective. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- FAUSTI, P.; POMPOLI, R. Intercomparison of computer programs for traffic noise simulations In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 1996, Liverpool. *Proceedings of Inter-noise*, 1996. v. 6, p. 3143-3148.

- FLORIANÓPOLIS. *Plano Diretor do Distrito Sede*, Prefeitura Municipal de Florianópolis, Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis, 1998.
- FLORIANÓPOLIS. Lei Complementar CMF nº 003 de 05 de julho de 1999. Dispõe sobre ruídos urbanos e proteção do bem estar e do sossego público. *D O E*, 06 jul. 1999.
- FLORIANÓPOLIS. Lei Complementar CMF nº 088 de 08 de outubro de 2001. Altera o sistema viário nos bairros Pantanal e Saco dos Limões e dá outras providências. *Diário Oficial nº 16765*, p. 43, 15 out. 2001.
- GERGES, S. N. Y. *Ruído: fundamentos e controle*. 1. ed. Florianópolis: UFSC, 1992.
- GUEIROS, T. S., ROSA, L. P. Urban noise: sick streets - sick buildings. In: 17th INTERN. CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- HASSAL, J. R.; ZAVERI, K. *Application of Brüel & Kjaer equipment to acoustic noise measurements*. Brüel & Kjaer, 1966.
- HILLQUIST, R. K.; SCOTT, W. N. Motor vehicle noise spectra: their characteristics and dependence upon operating parameter. *Journal of Acoustic Society of America*, v. 58 (1), 1975.
- HODGSON, M., Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classroom. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- HODGSON, M., REMPEL, R., KENNEDY, S., Measurement and prediction of typical speech and background noise levels in university classrooms during lectures. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- HODGSON, M.; NOSAL, E. Effect of noise and occupancy on optimal reverberation times for speech intelligibility in classrooms. *Journal of Acoustic Society of America*, v. 111 (2), p. 931-939, 2002.
- INSTITUTE OF ACOUSTICS (IOA). Acoustic Research Unit. *Certificate of competence in environmental noise measurement*. University of Liverpool. Apostila. 1996.
- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO URBANO DE FLORIANÓPOLIS (IPUF), Departamento de Transportes Urbanos, 2001. Consulta pessoal.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 1994: Model for quality assurance in production, installation and servicing. Geneva, Switzerland.

- IRVINE, L. K.; RICHARDS, R. L. *Acoustics and noise control handbook for architects and builders*. Florida: Krieger Publishing Company, 1998.
- JOHNSON D. R., SAUNDERS, E.G. The evaluation of noise from freely flowing road traffic. *Journal of Sound and Vibration*, v. 7 (2), p.. 287-309, 1968.
- KOBAYASHI, M.; MORIMOTO, M.; HAKAMADA, A.; SATO, H. The effect of repeating the same word-lists in listening test of word intelligibility and listening difficulty. In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- KURRA, S. Results of a pilot study about teachers annoyance relative to noise exposure in 3 high schools in Stanbul. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON NOISE CONTROL & ACOUSTICS FOR EDUCATIONAL BUILDINGS, 2000, Turquia. *Proceed.*, 2000. p. 47-56.
- LEEUWEN, J. A. Van; MANVELL, D.; NOTA, R. Some prediction models for the calculation of traffic noise in the environment. In: INTERNATIONAL CONF. ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 1996, Liverpool. *Proceed. of Inter-noise*, 1996. v. 6, p. 3139-3142.
- LEEUWEN, J. A. Van; NOTA, R. Some noise propagation models used for the prediction of traffic noise in the environment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 1997, Budapeste. *Proceedings of Inter-noise*, 1997. p. 919-922.
- MACKENZIE, D. J. Classroom acoustics – the way ahead. In: BUILDING FOR A SOUND EDUCATION, 1998, Londres. *Proceed. of the Institute of Acoustics*, v. 20 (4), 1998. p. 35-42.
- MACKENZIE, D. J. Noise levels and sourcers in UK schools. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON NOISE CONTROL & ACOUSTICS FOR EDUCATIONAL BUILDINGS, 2000, Turquia. *Proceedings*, 2000. p. 97-106.
- MENDES F. B.; HOLLER M. P.; BRENA E. *Caderno de referência e anteprojeto da nova sede do Curso de Arquitetura e Urbanismo*, 2001.
- NEUBAUER, R. O. Classroom acoustics - do existing reverberation time formulae provide reliable values? In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- ONAGA, H.; FURUE, Y.; IKEDA, T. On disagreement between Speech Transmission Index (STI) and speech intelligibility, In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.

- PEDRAZZI, T.; ENGEL, D.; KRÜGER, E.; ZANNIN, P. H. T. Avaliação do desempenho acústico em salas de aula do CEFET-PR. In: VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2001, São Paulo. Anais do VI ENCAC, 2001. 1 CD-ROM
- PEPPIN, R.J.; CAREY, J.; HELLSUND, H.; BEAM, M. Microphones theory and practice. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON NOISE CONTROL ENGINEERING, 1996, Liverpool. *Proceedings of Inter-noise*, 1996. v. 5, p. 2577-2580.
- RELACUS HOME PAGE. Disponível em: <<http://geocities.com/relacus/>>. Acessado em: jul. 2001.
- SALA, E.; VILJANEN, V. Improvement of acoustic conditions for speech communication in classroom, *Applied Acoustics*, 45, p. 81-91, 1995.
- SANTOS, M. J. O., SLAMA, J. G., Ruído no ambiente escolar: causas e conseqüências. In: II Encontro Nacional do Conforto no Ambiente Construído, 1993, Florianópolis. Anais do II ENCAC, 1993.
- SHIELD, B., JEFFERY, R., DOCKRELL, J., TACHMATZIDIS, I., A noise survey of primary schools in London. In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON NOISE CONTROL & ACOUSTICS FOR EDUCATIONAL BUILDINGS, 2000, Turquia. *Proceedings*, 2000. p. 109-118.
- STEELE, C. A critical review of some traffic noise prediction models. *Applied Acoustics*, v. 62, p. 217-287, 2001.
- STEPHENSON, R. J.; VULKAN, G. H. Traffic noise. *Journal of Sound and Vibration*, v. 7 (2), p. 247-262, 1968.
- SUTHERLAND, L. C.; LUBMAN, D. The impact of classroom acoustics on scholastic achievement, In: 17th INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 2001, Itália. *Proceedings of 17 ICA Rome*, 2001. 1 CD-ROM.
- TRAFFIC NOISE AND VIBRATION. *Design manual for roads and bridges*, v. 11(3), parte 7. Londres, 1993.
- VALLET, M. Some european standards on noise in educational buildings, In: INTERNATIONAL SIMPOSIUM ON NOISE CONTROL & ACOUSTICS FOR EDUCATIONAL BUILDINGS, 2000, Turquia. *Proceedings*, p.13-20, 2000.
- VASKOR J. G.; DICKINSON S. M.; BRADLEY J. S.; Effect of sampling on the statistical descriptors of traffic noise. *Applied Acoustics*, v. 12, p. 111-124, 1979.

- VILLELA, R.; BAPTISTA, C. Veja on line. ed. 1690, 7 mar. 2001. Disponível em: <<http://www2.uol.com.br/veja/070301/sumario.html>> Acessado em: mar. 2001.
- VIVEIROS, E. B. *Inteligibilidade acústica de salas avaliadas por um índice simplificado de transmissão de fala*, Florianópolis, 1989, Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, UFSC.
- VIVEIROS, E. Good acoustics: a target for the new school of architecture. *Journal of the Acoustic Society of America*, vol. 105(2), 1999.
- WETZEL, E.; NICOLAS, J.; ANDRE, P. H.; BOREUX, J. J. Modeling the propagation pathway of street-traffic noise: practical comparison of German guidelines and real-world measurements. *Applied Acoustics*, v. 57, p. 97-107, 1999.
- YANIV, S.L., DANNER, W.F., BAUER, J. W., Measurement and prediction of annoyance caused by time-varying highway noise, *Journal of Acoustic Society of America*, v. 72 (1), p. 200-207, 1982.
- ZWICKER, E., FASTL, H. *Psycho-acoustics facts and models*, 2. ed. Munich: Springer, 1990.