

Sensibilidade de parâmetros de um modelo de cálculo para a simulação do ambiente acústico urbano

GIUNTA, Mariene B.¹
SOUZA, Léa C. L.
VIVIANI, Eliane

¹ Universidade do Sagrado Coração, Bauru, Brasil. marigiunta@gmail.com

Resumo

A aplicabilidade do modelo de cálculo francês NMPB Routes 2008 para simulação do ruído ambiental urbano em uma cidade brasileira é abordada nesse artigo, considerando-se uma análise da sua sensibilidade aos parâmetros de entrada. Para isso o modelo de cálculo é aplicado em uma fração urbana da cidade de São Carlos - SP, através do programa computacional Cadna-A. A análise comparou dados de campo e dados simulados, além de serem realizadas simulações promovendo-se alterações nas configurações dos dados de entrada. Os parâmetros verificados com a análise de sensibilidade foram as condições meteorológicas, a duração do tempo de amostra do fluxo de veículos, a porcentagem de motocicletas em campos destinados ao número de veículos leves ou de veículos pesados, a velocidade dos veículos, o tipo de pavimentação, a declividade da via e a direção de fluxo de veículos, as alturas dos edifícios e as alturas de receptores, o tipo de fonte sonora e a quantidade de fontes sonoras inseridas por vias. Com exceção das condições meteorológicas, os resultados apontaram que o modelo, de uma forma geral, é sensível à maioria dos parâmetros analisados. Observou-se, no entanto, que alguns campos podem ser ajustados para que a simulação seja mais fidedigna aos dados reais.

Palavras-Chave: simulação acústica, mapeamento de ruído, parâmetros acústicos, conforto acústico.

Abstract

The applicability of the French model NMPB Routes 2008 for the simulation of the urban environmental noise in a Brazilian city is brought up in this paper, considering an analysis of the model sensitivity to the input parameters. For this purpose the calculation model is applied in an urban zone of the city of São Carlos - SP, by means of the software Cadna-A. The analysis compared field data and simulated data. Additionally simulations were processed, changing some input data configuration. The parameters verified with the sensitivity analysis were the meteorological conditions, the duration of the period of vehicular flow collection, the percentage of motorcycles in fields of light vehicles and heavy vehicles, the vehicular speed, the pavement type, the road declivity and direction of vehicular flow, the heights of the buildings and of receptors, the sound source type, and the quantity of sound sources per road. But for the meteorological conditions, the results proved that the model is sensible to the most part of the analyzed parameters. There is, however, an indication that some input fields could be adjusted to precisely fit to real data.

Keywords: acoustic simulation, noise mapping, acoustic parameters, acoustic comfort.

1. Introdução

Devido aos altos níveis de ruído que a população tem sido exposta, há cada vez mais a necessidade de estudos e ações por parte da gestão da cidade para a melhoria da qualidade de vida.

Pode-se, com auxílio da iniciativa privada e governamental, promover formas de informar e conscientizar a população sobre os riscos relacionados às exposições diárias aos altos níveis de ruído, envolvendo a cidade nas possíveis soluções dos problemas, tanto específicos, quanto gerais, além de introduzir a problemática da poluição sonora no planejamento urbano da cidade (VENTURA et al., 2008). Para medidas de identificação, controle e mitigação do ruído, é possível utilizar mapeamentos de ruído feitos através de levantamentos e coletas de dados ou simulações de cenários que auxiliam no processo de entendimento e no planejamento de ações preventivas ou mitigadoras. Uma forma de promover esse tipo de mapeamento é através da aplicação de modelos de cálculo para predição do ruído, incorporados a um programa computacional de simulação do ambiente urbano.

Desde a década de 50, vários modelos de predição de ruído vêm sendo desenvolvidos, conforme discutido por Steele (2001), na tentativa de serem melhores estudados e tratados os ruídos urbanos, como, por exemplo, o modelo de cálculo norte-americano FHWA - Traffic Noise Prediction Model, o modelo japonês ASJ Model-1993, o modelo CoRTN - Calculation of Road Traffic Noise, do Reino Unido, o modelo alemão RLS90 - Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (muito utilizado em outros países), o modelo Suíço StL-86 e o modelo Francês NMPB Routes 1996.

Em 2002, o Parlamento Europeu e o Conselho adotaram a Directiva Europeia de Ruído Ambiental (Directiva 2002/49/EC). A partir dela, os países membros da União Europeia tiveram a obrigatoriedade de produzir mapas estratégicos de ruído para todas as aglomerações com mais de 250.000 habitantes. Somado a isso, foram exigidos planos de ação destinados a gerir os problemas e consequências do ruído, incluindo a redução de ruído, pelas autoridades competentes para as principais rodovias, ferrovias e aglomerações (EU, 2002). Além do mapeamento de ruído realizado pelas cidades, os municípios devem disponibilizar as informações de forma clara, compreensível e acessível para o público em geral (MURPHY; KING, 2011).

Com a Directiva Europeia, muitos países passaram a criar seus próprios modelos para fazer os mapeamentos. Os modelos de cálculo, no entanto, muitas vezes requerem a fixação de condições específicas e limitações de aplicação, decorrentes da complexidade de interação entre os ruídos e o entorno urbano. Muitos desses modelos criados em países desenvolvidos consideram fontes sonoras, tipos de pavimentos, desenho urbano e propriedades das superfícies e materiais, que nem sempre são os mesmos encontrados nos demais países. Assim, as características desses elementos urbanos, somadas as suas condições de manutenção, podem causar diferenças significativas entre os níveis de pressão sonora atingidos nos diversos países e, conseqüentemente, discrepâncias entre valores estimados e reais. Por isso mesmo, a aplicação dos modelos não pode ocorrer de maneira indiscriminada, devendo sempre ser precedida de uma validação. No caso brasileiro, por exemplo, se comparada às condições europeias, podem ocorrer pavimentos mais rugosos, fontes sonoras veiculares mais poluidoras e materiais menos absorventes, que podem tender a causar níveis sonoros mais intensos.

Para os países europeus que não apresentem seu próprio método, a Directiva recomenda o uso do método francês denominado Novo Método de Previsão do Ruído do Tráfego (NMPB Routes-96 - French Method for Road Traffic Noise Prediction), para calcular a fonte e o modelo de propagação para o tráfego rodoviário. Este método é semelhante ao da ISO 9613-2 (ISO 9613 Parte 2, 1996), mas algumas de suas características são mais desenvolvidas, tais como as condições de propagação atmosférica (ARANA et.al., 2010).

O modelo NMPB Routes-96, revisado em 2008, baseia-se no cálculo do nível equivalente sonoro de longa duração (LLT), considerando a porcentagem das condições meteorológicas favoráveis (sob ação do vento) e das condições homogêneas. Seus cálculos consideram atenuações no caminho entre fonte e receptor, que podem ser devido à divergência geométrica, à absorção pelo ar, à difração, aos efeitos do solo e à absorção das superfícies verticais, como pode ser verificado na revisão do método demonstrada por DUTTILEUX et. al. (2008).

Diante do universo de variáveis envolvidas, a aplicação desse modelo em áreas urbanas brasileiras, portanto, requer um estudo que permita a verificação da adequação do modelo ao caso de estudo, através de testes de variáveis de entrada e comparações entre valores

calculados e valores medidos. nessa verificação, os programas computacionais que contam com esse modelo incorporado, como é o caso do CADNA-A, do Predictor, do SoundPlan, dentre outros.

Arana et.al. (2010) analisaram os dois programas computacionais mais utilizados para modelagem de previsão sonora, sendo eles o SoundPLAN e o Cadna-A. Naquela pesquisa, o modelo de cálculo NMPB Routes-96 foi aplicado através de ambos os programas para a modelagem de um mesmo local. Na comparação dos resultados houve pequenas diferenças de valores, mostrando a necessidade de análise da compatibilidade dos modelos com a realidade local e com as condições climáticas diferenciadas que podem existir para os diversos países.

Esse é o ponto enfatizado por esse artigo, que explora a fidelidade dos cálculos promovidos por um desses programas computacionais, o CADNA-A, quando o método aplicado é o NMPB-Routes, versão 2008.

2. Objetivo

O objetivo desta pesquisa é realizar testes de sensibilidade com variáveis de entrada do CADNA-A e comparar os valores dos níveis de pressão sonora [dB(A)] por ele estimados com os reais, quando o método o NMPB-Routes-2008 é acionado.

3. Método

O método consiste de três etapas básicas: seleção e caracterização de uma fração urbana

de estudo; aplicação do Cadna-A, acionando-se o método NMPB-Routes-2008, com testes de sensibilidade para diversas variáveis de entrada; e, comparação dos resultados para verificação da sensibilidade.

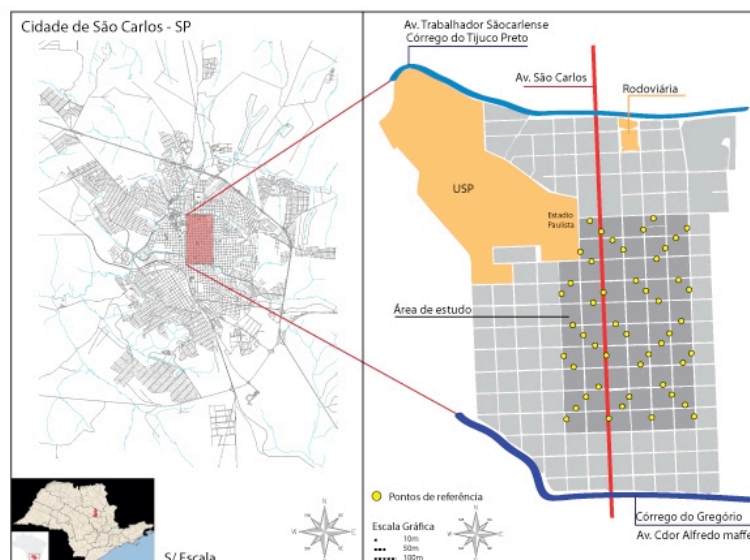
3.1 Seleção e caracterização de uma fração urbana de estudo

O estudo de sensibilidade baseou-se em dados coletados para uma fração urbana da cidade de São Carlos-SP, Brasil. Trata-se de uma cidade de médio porte, cuja população é de 219.865 habitantes (IBGE, 2010).

A fração de estudo localiza-se em região central, compreendendo a principal avenida da cidade, a Av. São Carlos. Essa, por sua vez, se caracteriza como um corredor de ligação, cortando grande parte da cidade. A área se delimita também por sua formação topográfica, ficando entre dois fundos de vales. Apresenta característica de uso misto, contendo diversas atividades diferenciadas como: edifícios residenciais e residências térreas, escolas, praças, igrejas, hospital, comércios e serviços. Por essa razão, gera um grande número de zonas de conflitos entre o uso e ocupação do solo e as suas características acústicas.

Nessa fração foram selecionados 48 pontos de referência (figura 1), para os quais foi realizado um levantamento físico para identificação das características do entorno, tais como: características das vias e passeios; tipo de pavimentação; direção de fluxo; altura de edifícios; forma de ocupação dos edifícios; tipos de usos; vegetação relevante; altura de muros; topografia. Esses dados permitiram a

Figura 1: Cidade São Carlos e pontos na área de estudo.



GIUNTA, M. B.; SOUZA, L. C. L.; VIVIANI, E. Sensibilidade de parâmetros de um modelo de cálculo para a simulação do ambiente acústico urbano. *Paranoá*, Brasília, nº 11, p. 77-86, 2014.

representação da área.

A partir da pesquisa de Giunta (2013), naqueles pontos de referência foram realizados ainda levantamentos dos níveis de pressão sonora equivalente [Leq(A)] e contagem do fluxo de veículos, durante 5 minutos, para cada período estudado (manhã, início da tarde e entardecer). O fluxo de veículos foi dividido em classes: leves, pesados e motocicletas. Esses dados serviram de dados de entrada para a simulação computacional.

3.2 Aplicação do Cadna-A associado ao método NMPB-Routes (versão 2008)

Para a área de estudo foram realizadas simulações no programa computacional Cadna-A, acionando-se o modelo de cálculo NMPB Routes-2008. O algoritmo do cálculo daquele modelo baseia-se nas equações do NMPB Routes-96, que considera o nível sonoro equivalente de longa duração (LLT) e as condições meteorológicas da área em estudo pela equação 1:

$$L_{LT} = 10 \log [p \cdot 10^{L_{LF}/10} + (1-p) \cdot 10^{L_{LH}/10}] \quad (1)$$

Onde:

p é a porcentagem de ocorrência média anual das condições meteorológicas favoráveis à propagação do ruído e assume valores entre $0 < p < 1$, em que 0 é uma tendência homogênea para a propagação e 1 uma tendência favorável à propagação.

L_{LF} é o nível sonoro para condições meteorológicas favoráveis do local, expresso pela equação 2.

$$L_{LF} = LW - A_{div} - A_{atm} - A_{solo,F} - A_{dif,F} - A_{ref} \quad (2)$$

L_{LH} é o nível sonoro para condições meteorológicas homogêneas do local, expresso pela equação 3.

$$L_{LH} = LW - A_{div} - A_{atm} - A_{solo,H} - A_{dif,H} - A_{ref} \quad (3)$$

Na equação 3, LW é o nível de potência sonora da fonte e o termo Ax representa as atenuações que ocorrem no caminho entre fonte e receptor, de forma que A_{div} é a atenuação devida à divergência geométrica, A_{atm} é a atenuação devida à absorção pelo ar atmosférico, A_{dif} é a atenuação devida à difração, A_{solo} é a atenuação devida aos efeitos ao solo, A_{ref} é atenuação devida à absorção das superfícies verticais nas quais o raio sonoro foi refletido (SILVA, 2010).

O nível de potência sonora (LW) é associado ao tráfego viário em função de suas características (fluxo, composição e velocidade média), bem como a tipologia e tipo de pavimento da via são

considerados através de fatores de correção. Os dados do tráfego relativos às duas categorias de veículos, leves e pesados, são tratados de forma agregada, ponderando o fluxo de veículos pesados, através de um fator de equivalência acústica entre os veículos. Assim o nível de potência sonora por metro de faixa longitudinal viária é calculada pela equação 4.

$$LW = LW_{VL} + 10 \log \left(\frac{\text{fluxo} + \text{fluxo} \times \%P \times \frac{EQ-1}{100}}{V_{50}} \right) - 30 \quad (4)$$

Onde:

LW_{VL} é o nível de potência sonora emitida por um veículo leve (W);

Fluxo é o número de veículos por hora por faixa de rodagem;

%P é a porcentagem de veículos pesados;

EQ é a equivalência de veículos pesados/veículos leves.

O fator de equivalência acústica entre veículos leves e pesados é dado pelas normas Francesas – NF S.31.085 (AFNOR, 1991, apud SILVA, 2010).

O nível de potência sonora de um veículo leve é obtido através da equação 5

$$LW_{VL} = 46 + 30 \log V_{50} + C \quad (5)$$

Onde:

V_{50} representa a velocidade do fluxo de veículos leves; quando V_{50} for menor que 30 ($V_{50} < 30$) considera-se para o cálculo $V_{50} = 30$;

C = 0 para fluxo de tráfego fluído;

C = 2 para fluxo de tráfego interrompido;

C = 3 para fluxo de tráfego em aceleração.

Esse método vem sendo aperfeiçoado ao longo dos anos, tendo sua última atualização datada de 2008, com modificações de cálculos que são detalhadas por Duttileux et. al. (2008).

Quando esse método é acionado através do programa computacional Cadna-A, os dados de input podem corresponder aos dados de pressão sonora ou ao fluxo de veículos, medidos in loco. No caso da análise de sensibilidade das variáveis, ambos os recursos foram utilizados, conforme o tipo de análise. Foram realizados 9 tipos de análises, promovendo-se modificações de configurações, de forma a ser alterado apenas um parâmetro de cada vez para cada análise. Quando a entrada de dados correspondeu ao fluxo de veículos medidos in loco durante 5 min, os valores variaram entre 59 a 75 dB(A), conforme a via. Quando a entrada de

dados correspondeu aos níveis sonoros equivalentes [Leq(A)] medidos naquele mesmo intervalo de tempo, os valores variaram entre 60 a 81 dB(A) conforme a via.

Para a realização dos testes de sensibilidade das variáveis, os principais parâmetros alterados foram: condições meteorológicas alternando entre as opções favorável, homogênea, aleatória ou default; tempo de fluxo alternando entre 5 minutos ou 1 hora, nesse último caso os valores foram tomados por extrapolação a partir da contagem de 5 minutos; porcentagem de motocicletas em campos de entrada diferentes alternando entre o campo de veículo leve ou pesado; velocidade dos veículos alternando entre 50 ou 60 km/h; tipo de pavimentação entre as opções dadas na biblioteca do programa denominadas como R1, R2 ou R3; inclinação da via alternando entre plana, ascendente ou descendente, juntamente com a direção do fluxo; altura dos edifícios, criando um cenário hipotético (aumentando a altura com base na taxa de ocupação e coeficiente de aproveitamento máximos permitidos na legislação municipal) e com diferentes alturas do receptor (1,2m, 4,0m, 10m e 16m); tipo de entrada da fonte alternando

entre Leq(A) e fluxo de veículos em 5 minutos; e quantidade de pontos inseridos na modelagem utilizando 48 pontos e 17 pontos (1 ponto por via).

As configurações de cada simulação são descritas na tabela 1, com destaque para os parâmetros de entrada que foram modificados para aquela análise.

3.3 Comparação dos resultados para verificação da sensibilidade

Os resultados para cada uma das configurações foram comparados entre pares dentro do tipo de análise, conforme pode ser verificado na tabela 2. As comparações foram realizadas para os três períodos de estudo (manhã, início da tarde e entardecer), com base nas diferenças mínimas, máximas e médias e pelo coeficiente de correlação (R).

Tabela 1: Configuração dos dados para a análise de sensibilidade dos parâmetros de simulação

| Simulação | Meteorologia | Fonte | Motocicleta | Velocidade | Pavimento | Inclinação | Cenário | Altura receptor |
|-----------|--------------|------------------|-------------|------------|-----------|------------|------------|-----------------|
| 1a | Favorável | Fluxo 5min | Leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 1b | Homogêneo | Fluxo 5min | Leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 1c | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 1d | Aleatório | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 2a | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 2b | Default | Fluxo 1 hora | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 3a | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 3b | Default | Fluxo 5min | pesado | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 4a | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 4b | Default | Fluxo 5min | leve | 60 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 5a | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 5b | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R2 | com | real | 1,2m |
| 5c | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R3 | com | real | 1,2m |
| 6a | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 6b | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | sem | real | 1,2m |
| 7a | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 7b | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 4,0m |
| 7c | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 10,0m |
| 7d | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | real | 16,0m |
| 7e | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | hipotético | 1,2m |
| 7f | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | hipotético | 4,0m |
| 7g | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | hipotético | 10,0m |
| 7h | Default | Fluxo 5min | leve | 50 km/h | R1 | com | hipotético | 16,0m |
| 8a | Default | Leq(A) 48 fontes | - | - | - | - | real | 1,2m |
| 8b | Default | Fluxo 5min | leve | 50km/h | R1 | com | real | 1,2m |
| 9a | Default | Leq(A) 17 fontes | - | - | - | - | real | 1,2m |
| 9b | Default | Fluxo 5min | leve | 50km/h | R1 | com | real | 1,2m |

Tabela 2: Pares de simulações correlacionadas para análise de sensibilidade

| Lei nº 6.621/1994 | | | ABNT NBR 10151/2000 | | |
|--------------------|--------|---------|--|--------|---------|
| Tipos de áreas | Diurno | Noturno | Tipos de áreas | Diurno | Noturno |
| Residencial (ZR) | 55 | 45 | Área estritamente residencial urbana, de hospitais ou de escolas | 50 | 45 |
| Diversificada (ZD) | 65 | 55 | Área mista, predominantemente residencial | 55 | 50 |
| | | | Área mista, com vocação comercial e administrativa | 60 | 55 |
| | | | Área mista, com vocação recreacional | 65 | 55 |

Tabela 3: Resultados da análise de sensibilidade às condições meteorológicas

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|
| Análise 1 | 1a x 1b | Manhã | 1,2m | 0,99 | 0,01 | -0,1 | 0,1 | 0,05 | Favorável > Homogêneo |
| | 1a x 1b | Início da tarde | 1,2m | 1,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | Favorável ~ Homogêneo |
| | 1a x 1b | Entardecer | 1,2m | 0,99 | 0,01 | -0,1 | 0,1 | 0,05 | Favorável > Homogêneo |
| | 1b x 1c | Manhã | 1,2m | 0,99 | 0,01 | -0,1 | 0,1 | 0,04 | Default > Homogêneo |
| | 1b x 1c | Início da tarde | 1,2m | 1,00 | 0 | 0 | 0 | 0 | Default ~ Homogêneo |
| | 1b x 1c | Entardecer | 1,2m | 0,99 | 0,01 | -0,1 | 0,1 | 0,05 | Default > Homogêneo |
| | 1c x 1d | Manhã | 1,2m | 0,98 | 1,0 | -0,1 | 1,8 | 0,65 | Aleatório > Default |
| | 1c x 1d | Início da tarde | 1,2m | 0,98 | 1,1 | 0 | 1,7 | 0,67 | Aleatório > Default |
| 1c x 1d | Entardecer | 1,2m | 0,98 | 1,1 | 0 | 1,7 | 0,67 | Aleatório > Default | |

Tabela 4: Resultados da análise de sensibilidade ao tempo de amostragem do fluxo de veículos

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------------|
| Análise 2 | 2a x 2b | Manhã | 1,2m | 0,98 | -11 | -12 | -6 | Fluxo 5min < Fluxo 1 hora |
| | 2a x 2b | Início da tarde | 1,2m | 0,96 | -11 | -11 | -6 | Fluxo 5min < Fluxo 1 hora |
| | 2a x 2b | Entardecer | 1,2m | 0,97 | -11 | -13 | -6 | Fluxo 5min < Fluxo 1 hora |

4. Resultados

Os resultados alcançados de cada análise são demonstrados nas tabelas 3 a 11, cada uma correspondendo a um dos parâmetros analisados.

Entre as opções padrões do programa para as condições meteorológicas (default, homogêneo e favorável), não foram constatadas diferenças significativas. O coeficiente de correlação foi de 0,99 entre eles e as diferenças mínimas de -0,1 e máxima de 0,1 dBA. Para a opção de condição meteorológica em aleatório, também não houve diferença significativa, apresentando coeficiente de correlação (R=0,98) significativo entre os dados e diferenças entre os valores dos resultados das simulações que variam -0,1 a 1,8 dBA. Esse resultado revelou existir pouca sensibilidade para mudanças nesse parâmetro.

No teste para a verificação da sensibilidade do tempo de amostragem do fluxo de veículos (Tabela 4), embora os dados demonstrem alta correlação entre si (0,96 a 0,98), a média das

diferenças entre as simulações foi de -11 dBA, com variações de -13 a -6 dBA. Para o fluxo de 1 hora os valores foram mais elevados do que os do fluxo de 5 minutos. Portanto, há sensibilidade para essa variável, com certa tendência a um padrão de diferenças que assume valores significativos.

Por não haver um campo específico para as motocicletas na inserção de dados das fontes, embora elas se enquadrem em veículos leves, a emissão sonora destes veículos não condiz com os mesmos. Desta forma, foram realizados testes para simulações com as motocicletas incluídas, tanto como veículos leves (simulação 3a), como na porcentagem junto aos veículos pesados (simulação 3b), apesar das diferenças existentes entre os seus espectros sonoros.

Os resultados (Tabela 5) mostraram que apesar de diferenças entre as simulações, há uma boa correlação entre os dados. A variação entre as simulações foi de -6 a 0 dBA, com média de -2 dBA. As simulações com as motocicletas em veículos leves obtiveram menores valores do

que as simulações com as motocicletas em veículos pesados. Assim, houve diferença significativa nos resultados e com tendência a um padrão, uma vez que a correlação foi alta.

Para a verificação das diferenças de simulações causadas pelas velocidades dos veículos (Tabela 6), os dados se mostraram bem correlacionados com $R=0,99$. Nas diferenças entre os resultados das simulações, houve um aumento de 1dBA na simulação com maior velocidade. Nessa situação, houve um padrão na diferença, que equivale a um aumento de 1 dBA ao aumentar a velocidade na ordem de 10 km/h.

Como o programa não deixa claro quais seriam os tipos de pavimentos encontrados na sua biblioteca, verificou-se também a sensibilidade para os diferentes pavimentos existentes na biblioteca do programa (Tabela 7), ou seja, R1 (simulação 5a), R2 (simulação 5b) e R3 (simulação 5c), para que pudesse ser verificado aquele que melhor se adequa ao estudo de caso.

Os dados foram bem correlacionados entre si, variando os coeficientes de correlação entre

0,98 e 0,99. As diferenças entre os resultados foi maior entre o R1 e R3 do que entre R1 e R2, mostrando, portanto, maior sensibilidade do programa quando alterado de R1 para R3. O teste com R2 revelou que os resultados tendem a subestimar os valores de maneira ainda mais intensa do que com o R1.

Outra análise realizada foi quanto à sensibilidade do modelo computacional à inclinação de vias e direção de fluxo de veículos (tabela 8). Em cada fonte de vias inseriram-se dados de fluxo em relação à inclinação, ou seja, se é uma via ascendente, descendente ou “estabilizada” (planas). As simulações foram realizadas inserindo-se as informações coletadas em campo das características de fluxo em relação à inclinação das vias, assim como também foram simuladas com inserção da condição “estabilizadas” em todas as vias.

O teste demonstrou que o modelo computacional apresenta uma sensibilidade para essa variável, com diferença entre as simulações de -0,2 a 2,4 dBA. A simulação com inserção das inclinações das vias resultou em valores maiores do que as simulações sem a inserção das inclinações.

Tabela 5: Resultados para sensibilidade à porcentagem de motocicletas em campos de entrada diferentes

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| Análise 3 | 3a x 3b | Manhã | 1,2m | 0,91 | -2 | -6 | 0 | 1,55 | mot. leve < mot. pesado |
| | 3a x 3b | Início da tarde | 1,2m | 0,87 | -2 | -5 | 0 | 1,42 | mot. leve < mot. pesado |
| | 3a x 3b | Entardecer | 1,2m | 0,89 | -2 | -5 | 0 | 1,54 | mot. leve < mot. pesado |

Tabela 6: Resultados para a análise de sensibilidade à velocidade dos veículos

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| Análise 4 | 4a x 4b | Manhã | 1,2m | 0,99 | 1 | 1 | 2 | 0,3 | 60km/h > 50km/h |
| | 4a x 4b | Início da tarde | 1,2m | 0,99 | 1 | 1 | 2 | 0,4 | 60km/h > 50km/h |
| | 4a x 4b | Entardecer | 1,2m | 0,99 | 1 | 1 | 2 | 0,4 | 60km/h > 50km/h |

Tabela 7: Resultados para a análise de sensibilidade ao tipo de pavimentação

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|---------|
| Análise 5 | 5a x 5b | Manhã | 1,2m | 0,99 | 1 | 0 | 1 | 0,3 | R1 > R2 |
| | 5a x 5b | Início da tarde | 1,2m | 0,99 | 1 | 0 | 1 | 0,3 | R1 > R2 |
| | 5a x 5b | Entardecer | 1,2m | 0,99 | 1 | 0 | 1 | 0,3 | R1 > R2 |
| | 5a x 5c | Manhã | 1,2m | 0,99 | -3 | -3 | -2 | 0,5 | R1 < R3 |
| | 5a x 5c | Início da tarde | 1,2m | 0,98 | -3 | -3 | -2 | 0,4 | R1 < R3 |
| | 5a x 5c | Entardecer | 1,2m | 0,99 | -3 | -3 | -2 | 0,5 | R1 < R3 |

Na análise apresentada na Tabela 9, foram realizadas simulações com o cenário real, baseada na coleta de alturas dos edifícios, e com o cenário hipotético, aumentando a altura de todas as edificações. Os receptores foram colocados a 1,2 m, 4 m, 10 m e 16 m de altura.

Para as alturas de 1,2 m e 4 m não houve mudanças significativas na propagação sonora com a alteração do cenário, uma vez que as diferenças foram inferiores a 1 dBA. Para a altura de 10 m, houve diferenças de até 1,8 dBA e para a altura de 16 m houve uma maior alteração, com diferença de até 3 dBA. Em todos os casos, para o cenário real foram obtidos valores maiores do que aqueles para o cenário hipotético. Ao contrário do esperado, para essa variável houve pouca sensibilidade do modelo computacional para as alturas de 1,2 e 4m, porém maior sensibilidade para 10 e 16m.

A análise apresentada na Tabela 10 correlaciona os dois tipos de fontes possíveis como dados de entrada: a fonte a partir do nível de pressão sonora equivalente (Leq em dBA) coletado nos 48 pontos; e a fonte a partir do fluxo de veículos (no caso de 5 minutos) nos mesmos pontos.

O coeficiente de determinação dessa análise de fonte sonora foi baixo, demonstrando uma correlação considerada média a baixa entre as simulações. O período da manhã apresentou R de 0,80, o início da tarde de 0,59 e o entardecer de 0,79. As variações das diferenças das simulações ficou entre -7 a 7 dBA, com média das diferenças de 1 e -1 dBA.

Para o período da manhã, a simulação com a fonte inserida em Leq [dB(A)] resultou em valores maiores que a simulação com o fluxo de veículos

Tabela 8: Resultados para a análise de sensibilidade à inclinação da via e à direção de fluxo de veículos

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-----------|
| Análise 6 | 6a x 6b | Manhã | 1,2m | 0,96 | 0,7 | -0,2 | 2,4 | 1,0 | com > sem |
| | 6a x 6b | Início da tarde | 1,2m | 0,93 | 0,7 | -0,2 | 2,4 | 1,0 | com > sem |
| | 6a x 6b | Entardecer | 1,2m | 0,95 | 0,7 | -0,2 | 2,4 | 1,0 | com > sem |

Tabela 9: Resultados para a análise de sensibilidade à altura dos edifícios, para um cenário hipotético com diferentes alturas do receptor.

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| Análise 7 | 7a x 7e | Manhã | 1,2m | 0,99 | 0,01 | 0 | 0,1 | 0,03 | Real > hipotético |
| | 7a x 7e | Início da tarde | 1,2m | 0,99 | 0,01 | 0 | 0,1 | 0,02 | Real > hipotético |
| | 7a x 7e | Entardecer | 1,2m | 1,0 | 0,01 | 0 | 0,1 | 0,02 | Real > hipotético |
| | 7b x 7f | Manhã | 4,0m | 0,99 | 0,04 | 0 | 0,3 | 0,06 | Real > hipotético |
| | 7b x 7f | Início da tarde | 4,0m | 0,99 | 0,02 | 0 | 0,2 | 0,05 | Real > hipotético |
| | 7b x 7f | Entardecer | 4,0m | 0,99 | 0,03 | 0 | 0,4 | 0,07 | Real > hipotético |
| | 7c x 7g | Manhã | 10,0m | 0,99 | 0,2 | 0 | 1,8 | 0,3 | Real > hipotético |
| | 7c x 7g | Início da tarde | 10,0m | 0,99 | 0,2 | 0 | 1,2 | 0,2 | Real > hipotético |
| | 7c x 7g | Entardecer | 10,0m | 0,99 | 0,2 | 0 | 1,8 | 0,3 | Real > hipotético |
| | 7d x 7h | Manhã | 16,0m | 0,99 | 1 | 0 | 3 | 0,6 | Real > hipotético |
| | 7d x 7h | Início da tarde | 16,0m | 0,99 | 0,4 | 0 | 2 | 0,4 | Real > hipotético |
| | 7d x 7h | Entardecer | 16,0m | 0,98 | 0,5 | 0 | 3 | 0,5 | Real > hipotético |

Tabela 10: Resultados para a análise de sensibilidade ao tipo de fonte

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| Análise 8 | 8a x 8b | Manhã | 1,2m | 0,80 | 1 | -3 | 7 | 2,6 | LAeq > Fluxo |
| | 8a x 8b | Início da tarde | 1,2m | 0,59 | -1 | -7 | 7 | 2,7 | LAeq < Fluxo |
| | 8a x 8b | Entardecer | 1,2m | 0,79 | -1 | -6 | 4 | 2,1 | LAeq < Fluxo |

Tabela 11: Resultados para a análise de sensibilidade à quantidade de pontos iniciais inseridos como fonte sonora

| | Correlação | Período | Altura receptor | R | Dif. Média [dB(A)] | Dif. Min. [dB(A)] | Dif. Max. [dB(A)] | Desvio Padrão [dB(A)] | Obs. |
|-----------|------------|-----------------|-----------------|------|--------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------------|
| Análise 9 | 9a x 9b | Manhã | 1,2m | 0,80 | 0 | -6 | 7 | 2,8 | LAeq ~ Fluxo |
| | 9a x 9b | Início da tarde | 1,2m | 0,52 | -1 | -7 | 8 | 3,0 | LAeq < Fluxo |
| | 9a x 9b | Entardecer | 1,2m | 0,69 | 0 | -6 | 8 | 2,8 | LAeq ~ Fluxo |

Tabela 12: Resultado de Sensibilidade dos parâmetros de simulação.

| análises | correlação | parâmetros | Sensibilidade |
|---|------------|---|----------------|
| Análise 1 - condições meteorológicas | 1a x 1b | Favorável / Homogêneo | insensível |
| | 1b x 1c | Homogêneo / Default | insensível |
| | 1c x 1d | Default / Aleatório | pouco sensível |
| Análise 2 - tempo de fluxo | 2a x 2b | Fluxo 5min / Fluxo 1 hora | sensível |
| Análise 3 - porcentagem de motocicletas em campos de entrada diferentes | 3a x 3b | Motocicleta em leve / Motocicleta em pesado | sensível |
| Análise 4 - velocidade dos veículos | 4a x 4b | 60km/h / 50km/h | sensível |
| Análise 5 - tipo de pavimentação | 5a x 5b | Pavimento R1 / Pavimento R2 | sensível |
| | 5a x 5c | Pavimento R1/Pavimento R3 | sensível |
| Análise 6 - inclinação da via e direção de fluxo | 6a x 6b | Com inclinação / Sem inclinação | sensível |
| Análise 7 - altura dos edifícios criando um cenário hipotético com diferentes alturas do receptor | 7a x 7e | Real / Hipotético | insensível |
| | 7b x 7f | Real / Hipotético | insensível |
| | 7c x 7g | Real / Hipotético | sensível |
| | 7d x 7h | Real / Hipotético | sensível |
| Análise 8 - tipo de fonte e quantidade de pontos analisados | 8a x 8b | LAeq (48fontes) / Fluxo | sensível |
| Análise 9 - tipo de fonte e quantidade de pontos analisados | 9a x9b | LAeq(17fontes) / Fluxo | sensível |

de 5 minutos. Para os demais períodos, a simulação em Leq [dB(A)] resultou em valores menores que o fluxo de veículos de 5 minutos, não havendo uma constância nesse caso.

Por fim, uma última análise (Tabela 11) foi realizada com a intenção de verificar uma forma de minimizar o tempo de execução de um possível levantamento de campo, para que o processo de registro de dados de ruído necessário ao mapeamento se tornasse mais prático. Para isso, foi realizado um estudo considerando o número mínimo de pontos necessários para a realização das simulações na área de estudo. Para a fração estudada, foram necessários no mínimo 17 pontos, o que corresponde a um ponto de referência em cada eixo de via, configurando a fonte sonora.

Para esta análise, o período da manhã manteve a mesma correlação da análise feita anteriormente para 48 pontos, com R de 0,80. Para os demais períodos houve uma diminuição dos valores de correlação, indicando que houve

sensibilidade do modelo computacional ao número de dados de entrada inseridos como fonte de ruído. As diferenças variaram entre valores de -7 a 8 dBA, porém a média ficou entre -1 a 0 dBA.

A tabela 12 resume os resultados alcançados quanto à sensibilidade do modelo computacional aos parâmetros de entrada. Nela, destaca-se o fato das condições meteorológicas não gerarem alteração significativa nos resultados. Esse é um ponto que merece maior investigação, levando-se em conta que pode ser uma característica específica do programa computacional utilizado e não do modelo de cálculo em si.

5. Conclusões

Há alguns campos de entrada do programa que precisam ser aprimorados para uma melhor aproximação com os dados reais. O caso mais evidente dessa situação é o das motocicletas, uma vez que não há como compará-las a

veículos leves (carros) ou veículos pesados (caminhões), não só pelo seu porte, mas também pelo seu espectro sonoro diferenciado. No entanto, o modelo computacional se mostra sensível a esse parâmetro.

Outro campo com necessidade de melhoria seria o que permite a entrada dos tipos de pavimentos. Para aplicação no Brasil, há necessidade que esses se assemelhem mais aos tipos brasileiros de pavimentos. Não fica claro no cálculo dentro do software, a que tipos de pavimento a biblioteca interna do programa se refere, ao separá-los por tipo 1, 2 ou 3, sem uma descrição detalhada, por isso foi necessário a verificação do parâmetro para verificar qual das opções oferece maior aproximação nos resultados para o estudo de caso.

Para simulação realizada através da inserção dos dados de Leq [dB(A)], foi feita a simulação com 48 pontos de inserção de fontes sonoras, mas esse número de pontos pode ser reduzido. A otimização desses pontos, no entanto, só é possível tomando-se certos cuidados e observando-se a escala a ser trabalhada, pois, a redução do número de pontos utilizados como fonte de entrada pode acarretar a diminuição da correlação entre dados simulados e reais. Outro aspecto importante a ser observado para uma redução de número de pontos é a necessidade de ser inserida nos dados de entrada uma fonte por via, pois se não há dados a serem colocados na via, o modelo não considera que existe nela uma fonte de ruído. A não existência da fonte influencia o resultado encontrado para o entorno e os interiores das quadras, afastando a simulação do modelo real. Para a simulação por inserção de dados do fluxo de veículos, também se faz necessário ter o fluxo de veículos de cada via para ser considerada como fonte sonora.

Os resultados apontam que a simulação é uma ferramenta poderosa e promissora, mas para a qual o manuseio exige certos cuidados e necessidades de melhor ajuste para as condições locais. Considerando-se a aplicação do modelo de forma provisória para países que não apresentam seu próprio modelo, é válida sua utilização como ferramenta de mapeamento e simulação sonora no meio urbano.

6. Referências Bibliográficas

ARANA, M.; San Martin, R.; San Martin, M. L. Strategic noise map of a major road carried out with two environmental prediction software packages. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 163, p. 503-513, 2010.

DUTILLEUX, G.; DEFRANCE, J.; GAUVREAU, B.; BESNARD, F. The revision of the French method for road traffic noise prediction. **Acoustics'08-Paris**, França, 2008.

EUROPEAN UNION. Directive 2002/49/EC - relating to the assessment and management of environmental noise. **Official Journal of the European Communities**, 2002.

GIUNTA, M.B. Análise de modelagem de previsão acústica e mapeamento sonoro para a cidade de São Carlos-SP. Dissertação de mestrado do Programa de Pós graduação em Engenharia Urbana. UFSCar. 2013

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (**IBGE**). Indicadores sociais municipais: uma análise dos resultados do universo do Censo Demográfico. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/link.php?codmun=354890>>. Acesso em: fev. de 2013.

MURPHY, E.; KING, E. A. Scenario analysis and noise action planning: modelling the impact of mitigation measures on population exposure. **Applied Acoustics**, v. 72, p. 487 – 494, 2011.

STEELE, C. A Critical Review of Some Traffic Noise Prediction Models. **Applied Acoustics**, v. 62, p. 271-287, 2001.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela bolsa concedida e à FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de São Paulo financiamento através do auxílio ao projeto de pesquisa.