

FIA 2020/22

XII CONGRESSO/CONGRESO IBEROAMERICANO DE ACÚSTICA
XXIX ENCONTRO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA - SOBRAC

Florianópolis, SC, Brasil

Simulação da incidência sonora em fachadas: Estudo de Caso em Edifício Multifamiliar.

Rodrigues, M. N.¹; Vecchi, M.A.M²; Rodrigues, F.C.³;

^{1,2} Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal de Minas Gerais, mairanrodr@gmail.com; vecchi@dees.ufmg.br

³ Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, frascisco@dees.ufmg.br.

Resumo

A classificação do ruído de exposição de fachadas de edifícios, visando o desempenho prescrito pela norma ABNT NBR 15575:2013, é uma questão que causa divergência entre os profissionais envolvidos nas etapas do projeto, ocasionando em metodologias e resultados conflitantes nas análises do terreno e entorno de determinado empreendimento. Em muitos casos, especialmente para fachadas de edifícios verticais, medições sonoras próximas ao nível do solo não são suficientes, pois nos andares elevados o campo sonoro é bastante diverso. Uma vez que esta classificação é previa ao projeto, simulações acústicas têm sido uma ferramenta bastante utilizada, permitindo a avaliação do som incidente ao longo de todas as fachadas da edificação. Entretanto, ainda não há no Brasil uma metodologia regulamentada para determinação da classe de ruído por simulações, dando abertura para abordagens diferentes entre profissionais e pesquisadores da área. Além disto, os métodos de cálculo implementados nos softwares comerciais de simulação foram definidos e validados com base em dados coletados nos seus países de origem, cenários, muitas vezes, distantes da realidade brasileira. Neste contexto, o presente trabalho analisa a incidência sonora nas fachadas de um edifício multifamiliar, localizado em Belo Horizonte-MG, a partir de simulações acústicas utilizando os métodos de cálculo CRTN, ISO 9613-1/2 + RMV-SRM2, Harmonoise, NMPB 2008 e CNOSSOS, implementados nos software Predictor-LimA. Os resultados foram comparados com medições sonoras realizadas nas principais vias de tráfego do entorno e a 2 m da fachada, em três andares da edificação. Com isto, identificou-se o método de cálculo que melhor representava o cenário avaliado. Adicionalmente, foi possível observar que as discrepâncias entre os valores simulados e medidos eram distintas nos locais próximos às fontes sonoras e nos pontos a 2 m da fachada, indicando a necessidade de ajustes nos parâmetros do modelo simulado e possíveis imprecisões nos métodos de cálculo utilizados.

Palavras-chave: incidência sonora, simulação acústica, classe de ruído, predição de ruído de tráfego.

Prediction of incident noise at building façades: Case study of a multi-storey building.

Abstract

Classify exposure noise at building facades aiming prescribed performance by ABNT NBR 15575:2013 standard is a divergent issue between designers and consultants involved in all project phases which results in conflicted methodologies and divergent evaluation of collected information. In many cases, especially for vertical buildings facades, sound measurements nearby ground are not sufficient to characterize the incident noise once the sound field at higher floors is quite diverse. Sound predictions have been a widely tool allowing evaluate the incident sound along all the building facade. However, there is no regulated methodology in Brazil to determine the noise class by predictive methods, permitting different approaches between acoustics professionals and researchers. In addition, the calculation methods implemented in commercial simulation software were developed and validated based on their origin countries data where scenarios often diverged from Brazilian reality. In this context, the present work evaluated noise incident at a multi-storey building facades located in Belo Horizonte-MG, through sound prediction using CRTN, ISO 9613-1/2 + RTN-SRM2, Harmonoise, NMPB 2008 and CNOSSOS calculation models implemented in Predictor-LimA software. To evaluate the estimated results, sound measurements was made at main traffic roads and at 2 meters from front façades, at three different floors. Measured and estimated results was compared indicating the best estimator model for the evaluated scenario. Additionally, was identified distinct discrepancies between the values at traffic roads points and façades points, suggesting required corrections of the simulation models parameters and possible inaccuracies of the calculation methods to estimate noise levels of the scenario studied.



Keywords: incident noise, façade, sound prediction, noise class, traffic noise prediction models

1. INTRODUÇÃO

O ruído urbano externo às edificações é determinante no desempenho acústico de suas fachadas, tornando fundamental a caracterização e análise do ruído ambiental ao longo do processo de projeto de edifícios. Recentemente a norma de desempenho de edificações – ABNT NBR 15575 – definiu os requisitos de desempenho dos sistemas de fechamento externos em função da classe do ruído externo [1]. Entretanto, esta definição ainda é bastante controversa, uma vez que não oferece valores objetivos para a classificação do ruído. Neste contexto, a Proacústica [2] disponibilizou algumas referências para boas práticas na avaliação da classe de ruído de exposição das edificações, a partir de um consenso entre os profissionais associados, definindo as classes de ruído por faixa de valores de níveis de pressão sonora incidentes sobre as fachadas (Tabela 1). Esta iniciativa foi bastante relevante, pois estabeleceu uma referência objetiva para classificação do ruído, porém ainda não foram divulgados dados que comprovem que a classificação proposta garante o atendimento aos limites de ruído interno.

A norma brasileira de desempenho de edificações e guias orientativos sugerem como opção de avaliação do som externo às fachadas dos edifícios a utilização de simulações acústicas do entorno [1, 3]. Entretanto, ainda não está disponível nenhuma metodologia desenvolvida e regulamentada, dando abertura para abordagens discrepantes entre profissionais e pesquisadores da área. Estas simulações são geralmente realizadas em softwares comerciais para elaboração de mapas de ruído, utilizando métodos de cálculos definidos e validados nas realidades dos seus países de origem, nos quais as características locais são variáveis de entrada importantes para obter resultados aceitáveis.

No caso de edifícios residenciais de múltiplos pavimentos, caracterizar o campo sonoro do entorno nas ruas não é suficiente, pois as

condições próximas às fachadas dos pavimentos, principalmente dos mais elevados, serão distintas, podendo variar consideravelmente em sua extensão. Neste contexto, a utilização de simulações acústicas para análise da incidência sonora em fachada tem sido importante ferramenta para análise dos níveis de exposição e definição de isolamento de fachadas, prévia à construção da edificação. Em geral, tem-se a ideia de que quanto mais elevado o pavimento, mais silencioso ele será. Entretanto, alguns profissionais e pesquisadores de acústica acreditam que nem sempre este raciocínio se aplica, pois isto depende bastante da configuração do espaço onde o edifício se insere e das relações com as fontes sonoras [5, 6].

Em alguns trabalhos, a validação das simulações acústicas de ruído urbano é feita a partir de medições em campo nas vias de tráfego. Porém para análise dos resultados da simulação do som incidente em fachadas, acredita-se que sejam necessárias medições nas posições próximas às fachadas e em diferentes alturas em relação ao solo. Espera-se também que a calibração do modelo para a análise sonora na fachada não é a mesma para avaliação dos locais próximos às vias, como já sugerido por Probst [7].

Não há dúvidas que se trata de uma ferramenta importante para análise das condições ambientais de exposição das edificações, no entanto, identifica-se a necessidade de maiores investigações sobre a utilização de simulações acústicas para prever as incidências sonoras nas fachadas, bem como dos métodos de cálculo disponíveis atualmente. Diante do exposto, este trabalho apresenta avaliações da incidência sonora nas fachadas de um edifício multifamiliar, localizado em Belo Horizonte-MG, a partir de medições e simulações acústicas utilizando os métodos de cálculo CRTN, ISO 9613-1/2 + RMV-SRM2, Harmonoise, NMPB 2008 e CNOSSOS, implementados nos software Predictor-Lima.

Tabela 1: Valores mínimos de $D_{2m,nT,w}$ das fachadas de dormitórios, segundo a NBR 15575-4, para cada classe de ruído e valores de referência de L_{Aeq} para classificação, sugeridos pela ProAcústica. [1, 2].

Classe de Ruído	Definição NBR 15575-4	Ref. . Proacústica $L_{Aeq,T}$ (dB)	$D_{2m,nT,w}$ (dB)
I	Habitação localizada distante de fontes sonoras de ruído intenso de quaisquer naturezas	Até 60	≥ 20
II	Habitação localizada em áreas sujeitas a situações de ruído não enquadráveis nas classes I e III	60 a 65	≥ 25
III	Habitação sujeita a ruído intenso de meios de transporte e de outras naturezas, desde que conforme a legislação.	65 a 70	≥ 30

2. SIMULAÇÃO DE RUÍDO AMBIENTAL

A simulação acústica de ruído ambiental é bastante utilizada na avaliação de áreas urbanas, principalmente, na elaboração de mapas de ruído, podendo atender a diferentes objetivos no planejamento urbano, gestão ambiental, avaliação de risco à saúde da população, definição de diretrizes para isolamento de ruído nas edificações e elaboração de soluções para atenuação do ruído.

No Brasil, importante destaque tem sido dado ao mapeamento de ruído da cidade de São Paulo. Em 2018, foi elaborado mapa piloto do centro e no ano seguinte a prefeitura publicou regulamento para elaboração do mapa de ruído de toda a cidade. Além disto, apesar de ainda bem iminente, existem alguns casos de mapeamentos parciais das cidades de Belém e Fortaleza fomentados por órgãos municipais [8] [9]. Por outro lado, esta ferramenta é amplamente adotada em pesquisas científicas ao redor do país [8, 10-14]. Analisando estes trabalhos, observou-se uma variação na escolha dos modelos de cálculo da propagação sonora e nível de potência sonora do ruído de tráfego, destacando-se os métodos RLS 90, ISO 9613-1/2 + RMV-SRM2 e NMPB 2008, com exceção de mapa elaborado na região central de Belo Horizonte, que foi construído pela interpolação de uma malha triangular de pontos de medição, quando os modelos de predição de ruído de tráfego implementados em softwares eram muito restritos [14].

No contexto europeu, os mapas de ruído são obrigatórios para cidades com mais de 250 mil habitantes ou influenciadas por grandes empreendimentos de infraestrutura de

transporte (rodovias, ferrovias, aeroportos) [15]. Esta obrigatoriedade impulsionou discussões e desenvolvimento de procedimentos metodológicos para elaboração destes mapas, regulamentados pela Diretiva 2015/996 [16].

Na América Latina, foram encontrados alguns exemplos, como de mapas de ruído elaborados no Chile e Colômbia. Suárez e Barros [17] avaliam alguns aspectos sobre mapas de ruído elaborados para a cidade de Santiago-Chile, comparando os modelos de predição RLS90 (Alemão), STL 86 (Suíço), SP 48 (Nórdico) e CRTN (Britânico) com medições em 52 pontos espalhado na cidade, posicionados próximos a diferentes categorias de vias de tráfego. Ramírez e Domínguez [18] elaboraram modelos de simulação do ruído de tráfego de recortes na cidade de Bogotá, comparando os métodos de cálculo alemão RLS 90, CRTN, nórdico Nord 2000 e norte americano, FHWA, a partir de indicadores erros médios absolutos e coeficiente de correlação de Pearson.

Trabalhos referentes às simulações acústicas ambientais com o objetivo específico de avaliar a incidência sonora nas fachadas são menos comuns. Dentre eles se destaca o trabalho de Kurra e Dal [19], que sugeriram classificar as fachadas das edificações pela exigência de desempenho de isolamento sonora, utilizando como ferramenta os softwares para elaboração de mapas de ruídos. No Brasil, pode-se exemplificar a pesquisa apresentada Oliveira Filho e Zannin [20], que propuseram uma análise das necessidades de isolamento sonora em fachadas ao longo da altura do edifício utilizando os requisitos estabelecidos pela norma alemã DIN 4109 em estudo de caso de um edifício de 26 pavimentos, em Curitiba-PR.



A validação do modelo foi realizada pela comparação dos resultados simulados com valores medidos in loco em 3 posições durante 10 minutos, sendo uma destas posições situada na varanda do 21º pavimento da edificação.

A partir de simulações acústicas são apresentadas em [6] algumas orientações para determinação da Classe de Ruído para definição do requisito de desempenho das fachadas de edificações, baseado nos resultados de medições e simulações em um estudo de caso na cidade do Rio de Janeiro. No entanto, não ficou evidenciado no trabalho se foram avaliadas medições sonoras em diferentes alturas em relação ao solo para validação dos resultados.

2.1 Métodos de cálculo

Atualmente existem disponíveis inúmeros métodos de cálculo de propagação sonora e predição de emissão sonora de ruído de tráfego. Para discussão e análises deste trabalho foram escolhidos alguns destes métodos: a norma ISO 9613/1-2, combinada com o método holandês RMV-SRM2 para modelagem das fontes sonoras, o método britânico CRTN, o francês NMPB 2008, o europeu Harmonoise e o CNOSSOS, atualmente regulamentado pela União Europeia.

A norma ISO 9613 - parte 1 e 2 – descreve modelos de cálculo para atenuação sonora ao longo da propagação do som ao ar livre, desenvolvido a partir de dados empíricos de pesquisas ao longo de muitos anos com abordagem simplificada da propagação sonora. Considerando o nível de pressão sonora em um determinado receptor como resultante da emissão sonora e dos diversos efeitos de atenuação no caminho de propagação, a ISO 9613-2 define o Nível de Pressão Sonora (dB) como [21]:

$$L_p = L_w + DI_\theta + A \quad (1)$$

Sendo L_w , a potência sonora da fonte, DI_θ , a diretividade da mesma e A , a atenuação que ocorre durante a propagação devida à divergência geométrica, à absorção atmosférica, ao efeito de absorção ou reflexão do solo e aos efeitos de difração e reflexão de outras superfícies

A ISO 9613 não traz orientação específica para determinar nível de potência sonora emitida por tráfego de veículos, portanto, o software Predictor Lim-A utiliza o método holandês RMV-SRM2 para simular a emissão sonora do tráfego de veículos do modelo, conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Equação (2).

$$L_w = a + b \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) + 10 \log\left(\frac{Q}{v}\right) \quad (2)$$

Sendo a velocidade de referência, $v_{ref} = 70$ km/h; v é a velocidade dos veículos e Q , o fluxo de veículos por hora. Os coeficientes de regressão a e b variam com a classe de veículos – leves, pesados, médios e motocicletas – e frequência sonora. Correções em função da aceleração e tipo de pavimentação são adotadas.

O método CRTN – Calculation of Road Traffic Noise – foi desenvolvido por pesquisadores acústicos inicialmente em 1975 e, em 1988, foi oficialmente adotado pelo Departamento do meio ambiente do Reino Unido como método de predição de ruído de tráfego de rodovias [22]. O método original CRTN determina o L_{A10} como descritor sonoro para análise de ruído de tráfego ambiental, conforme Equação (3), entretanto neste trabalho adota-se o L_{Aeq} , convertido pelo software pela Equação (4).

$$L_{A10} = 10 \log Q + 33 \log\left(v + 40 + \frac{500}{v}\right) - 26,6 + A \quad (3)$$

$$L_{Aeq,1h} = 0,94L_{A10} + 0,77 \quad (4)$$

Onde Q é o fluxo de veículo por hora, v a velocidade praticada na via e A , a atenuação da propagação sonora no ambiente. Além disto, são aplicadas correções para o gradiente da via de tráfego, tipo de pavimentação e porcentagem de fluxo de veículos pesados.

O método de cálculo NMPB 2008 é bastante similar ao definido pela ISO 9613-2, pois aplica de maneira simplificada a geometria da propagação sonora. Para as emissões das fontes sonoras, o método NMPB 2008 distingue os veículos entre leves – VL – e pesados – VP, com emissão sonora, em dB/m, a 0,5 m do solo, determinada pela Equação (5). [23] [24].

$$L'_W = a + b \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad (5)$$

Sendo $v_{ref} = 90$ km/h para VL e 80 Km/h para VP. Os coeficientes de regressão, a e b , variam com a categoria do veículo do veículo, condição de fluxo, tipo de via e tipo de ruído emitido (de propulsão ou de rolamento). Adicionalmente, são aplicadas correções em função da idade da pavimentação, gradiente da via e frequência sonora. Após determinar a potência sonora 'linear', o resultado é convertido em uma potência sonora pontual (dB), dada pela Equação (6).

$$L_W = L'_W + 10 \log(l) \quad (6)$$

Sendo l , o comprimento da fonte linear (m).

O método de predição de ruído de tráfego Harmonoise, finalizado em 2004, foi um projeto Europeu desenvolvido para ser utilizado como ferramenta para elaboração de mapas estratégicos de ruído, exigidos pela Diretiva 2002/49/CE de 2002. Posteriormente, o grupo de trabalho desenvolveu o projeto Imagine que acrescenta ao método uma abordagem mais detalhada dos modelos de emissão sonora de veículos. O Harmonoise é considerado mais complexo, pois é baseado em métodos numéricos de predição da propagação sonora, no intuito de representar melhor os fenômenos físicos envolvidos. Isto implicou em tempo maior de processamento dos cálculos pelos softwares disponíveis e a melhoria na precisão dos resultados obtidos foi bastante questionada por alguns estudos [25]. Por outro lado, a contribuição para cálculo da emissão sonora de veículos foi bastante relevante.

Neste método, assim como o NMPB2008, a potência sonora é dividida em duas componentes: uma correspondente ao ruído de rolamento do veículo – L_{WR} – e outra correspondente ao ruído de propulsão – L_{WP} , dadas pelas Equações (7) e (8) [26].

$$L_{WR} = a_R + b_R \log\left(\frac{v}{v_{ref}}\right) \quad (7)$$

$$L_{WP} = a_P + b_P \log\left(\frac{v - v_{ref}}{v_{ref}}\right) \quad (8)$$

Sendo $v_{ref} = 70$ km/h. Os coeficientes de regressão variam com a frequência sonora e classe de veículo. Correções em função da aceleração, gradiente da via, temperatura, pista molhada, tipo de pavimentação e diretividade são aplicadas. Adicionalmente, foram definidas diferentes alturas para emissão do ruído de rolamento e de propulsão, para cada classe de veículos.

O último método de cálculo utilizado nas simulações acústicas do estudo de caso é o CNOSSOS, estabelecido em 2015 como método comum da união europeia por meio da Diretiva 2015/996 [16]. O procedimento de cálculo da propagação sonora ambiental do CNOSSOS é praticamente idêntico ao método francês NMPB 2008, enquanto o método de cálculo da emissão sonora, é similar ao definido pelo método Harmonoise, contudo a fonte sonora é posicionada em uma única altura, a 5 cm do solo, para todas as categorias.

3. MÉTODOS

O desenvolvimento deste trabalho consistiu em análises do ruído de entorno e da incidência sonora nas principais fachadas em um edifício multifamiliar vertical, localizado em Belo Horizonte, através de medições e simulações sonoras.

3.1 Objeto de estudo

O estudo de caso exemplificado neste trabalho trata-se de em edifício multifamiliar de 20 pavimentos, localizado na região oeste de Belo Horizonte-MG, com urbanização bastante consolidada e vias de entorno de fluxos de veículos intensos. A edificação apresenta implantação em esquina, sendo a fachada denominada A, orientada para via coletora com tráfego de ônibus coletivo, e a fachada denominada B, orientada para via coletora sem tráfego de ônibus.

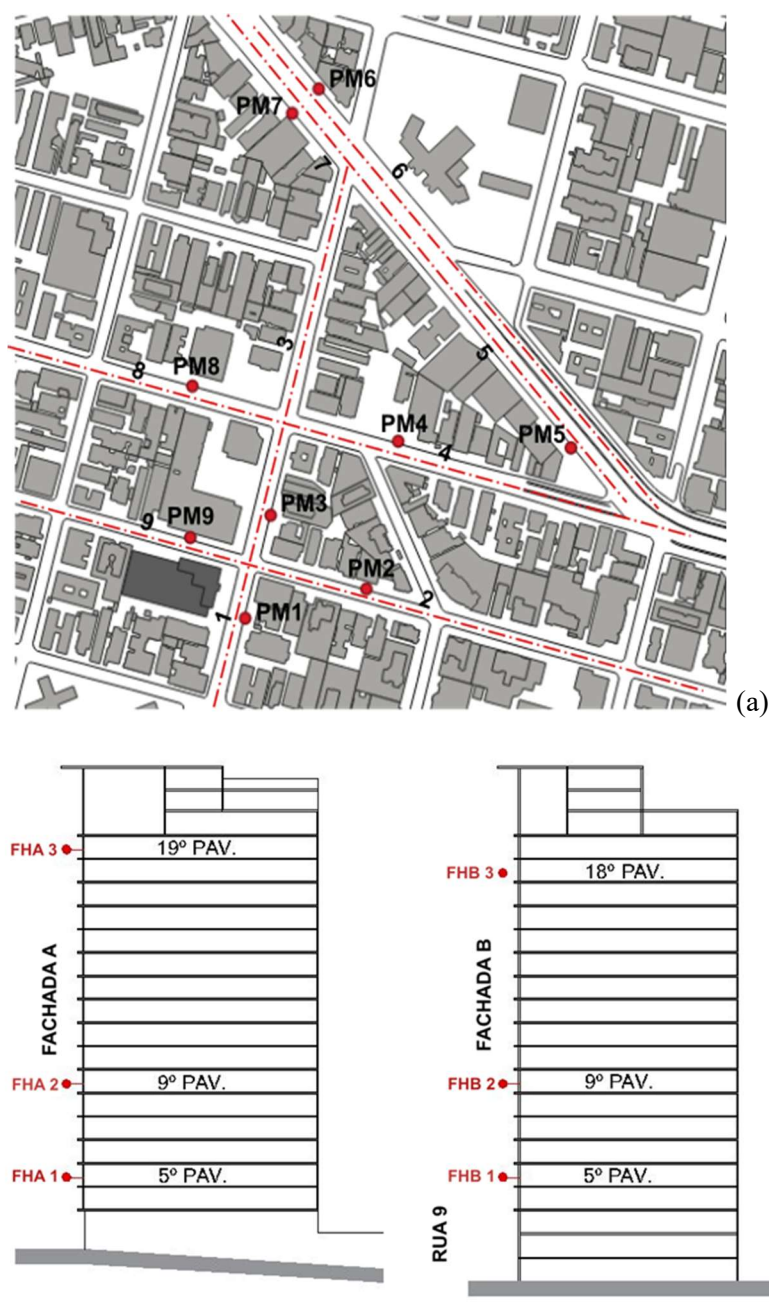


Figura 1:Entorno (a) e cortes esquemáticos do edifício em estudo (b), com indicação dos pontos de medição sonora nas ruas e fachadas.

3.2 Avaliação acústica das fachadas e entorno

Com o intuito de caracterizar o ruído de exposição das fachadas em estudo, foram realizadas medições sonoras do nível de pressão sonora contínuo equivalente a 2 metros de cada fachada, com tempo de integração de 1h, $L_{Aeq,1h}$, em 3 andares, como ilustrado nas **Erro! Fonte de referência não encontrada.**(b). Para avaliação do ruído de entorno, foram definidos pontos para medição do L_{Aeq} das principais vias de tráfego no mesmo período das medições nas fachadas. O procedimento foi realizado em

conformidade com ABNT NBR 10151:2019, com microfones posicionados a 1,5 m do solo e tempo de integração de 5 min em cada ponto de medição, repetindo o processo para cada medição na fachada, resultando em 15 minutos em cada ponto. Durante as medições nas ruas, foram contados o número de veículos leves e pesados que trafegaram na via. Carros, vans e caminhonetes foram considerados veículos leves, enquanto ônibus, caminhões e motocicletas foram considerados veículos pesados.

3.3 Construção do modelo para simulação Acústica

As simulações acústicas do ruído de entorno e incidente nas fachadas estudadas foram realizadas no software Predictor-LimA. O software oferece interface com arquivos de dados geoespaciais e de modelos CAD, como o *shapefile* e *dxf*, facilitando a construção do modelo tridimensional.

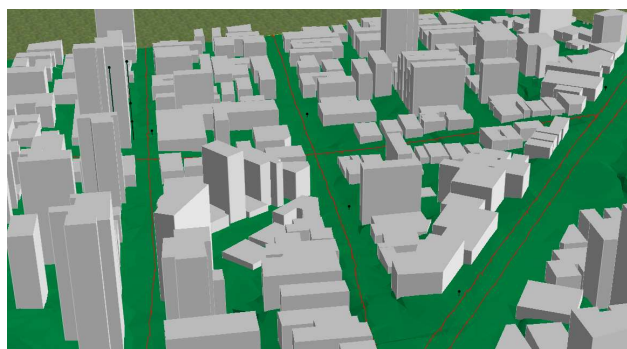


Figura 2: Modelo 3D das simulações sonoras do estudo de caso, elaborado no software Predictor-LimA.

As fontes sonoras foram caracterizadas pelas informações coletadas nos dias das medições sonoras, tendo o volume de tráfego determinado pela contagem de veículos no local e a velocidade adotada como a máxima permitida nos trechos das vias. Uma vez que os métodos de cálculos utilizados não apresentam concordância quanto a classificação dos veículos, optou-se por dividir a composição de tráfego entre veículos leves – VL – e pesados – VP, considerando motocicletas como veículos pesados. A Tabela 2 apresenta os dados coletados e inseridos nos modelos de simulação para caracterização das fontes de ruído de tráfego. As geometrias de vias, edificações e terreno foram definidas a partir de dados georreferenciados coletados nos órgãos de gestão urbana da prefeitura de Belo Horizonte. Para estimativa das alturas dos edifícios de entorno, utilizou-se visitas no local, *Google Street View* e *Google Earth*, pois estes dados não estavam disponíveis em arquivos *shapefile*. Os parâmetros ambientais de umidade e temperatura foram aferidos nos dias das medições sonoras, utilizando a média dos valores registrados durante as medições realizadas. A fim de avaliar os níveis de pressão sonora simulados, optou-se pela inserção de

receptores sonoros nas posições onde foram realizadas as medições acústicas nas ruas e fachadas.

Tabela 2: Fluxos de veículos e velocidades para caracterização das fontes sonoras de tráfego nos modelos de simulação acústica.

Rua	Veículos/h	VL/h	VP/h	% de VP/h	Vmáx (Km/h)
1	972	900	72	7%	40
2	456	420	36	8%	40
3	1008	936	72	7%	40
4	1952	1628	324	17%	40
5	2136	1832	304	14%	60
6	1588	1364	224	14%	60
7	2540	2256	284	11%	60
8	1745	1473	272	16%	40
9	580	504	76	13%	40

3.4 Avaliação dos resultados da simulação

O método mais comum para avaliar os resultados das simulações acústicas é pela comparação de uma amostra dos valores simulados com os valores medidos no local. Para analisar erros de modelos de predição é possível utilizar indicadores de desempenho estatísticos, muito empregados nas avaliações de previsões em diversas áreas de estudo, sendo também uma relevante ferramenta para comparação entre modelos e métodos de cálculo. Neste trabalho, foram comparados os níveis de pressão sonora equivalentes obtidos pelas simulações acústicas, L_{Si} , com os valores medidos no local, L_{Mi} . Com isto foi possível determinar os indicadores estatísticos erro médio (*Mean Error* - ME), erro absoluto médio (*Mean Absolut Error* – MAE) e coeficiente de correlação de Pearson, r , conforme Equações (9) a (11). O primeiro indica o viés da simulação, ou seja, a tendência do modelo em subestimar ou superestimar a grandeza de interesse. Uma vez que o erro médio possibilita que desvios positivos e negativos com mesma magnitude sejam anulados, optou-se por avaliar também o erro absoluto médio (*Mean Absolut Error* – MAE). Já o coeficiente de correlação é um parâmetro que demonstra o grau de determinação entre os valores simulados e medidos, permitindo avaliar a qualidade da construção do modelo e cálculos adotados, sendo que valores próximos de 1 demonstram uma correlação alta entre as variáveis e os que



se aproximam de 0 demonstram correlação inexistente [27].

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)}{n} \quad (9)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |E_i - O_i|}{n} \quad (10)$$

$$r = \frac{n(\sum E_i O_i) - (\sum E_i \sum O_i)}{\sqrt{n(\sum E_i^2) - (\sum E_i)^2} \cdot \sqrt{n(\sum O_i^2) - (\sum O_i)^2}} \quad (11)$$

Sendo E_i são os valores estimados (*simulados*); O_i são os valores observados (*medidos*) e n é o número de estimativas realizadas.

O erro esperado na comparação entre os resultados das simulações e medições é zero, no entanto é muito comum na avaliação de simulações acústicas estabelecer diferenças aceitáveis entre os resultados encontrados. Estes valores de referência não é consenso entre os profissionais da área e variam entre 0 e 5 dB [8,11-13, 28, 29]. É plausível admitir que os erros aceitáveis na simulação acústica variam de acordo com a escala do modelo. As simulações de grandes áreas, como uma cidade ou bairro, podem gerar maiores erros, além de ser admissível adotar algumas simplificações nos cálculos e nos dados de entrada. No entanto, modelos que abrangem áreas menores, a margem de erro deve ser menor. Manvell e

Hartog van Banda [30] sugerem um erro de 3 dB para modelos de grande escala e 0 dB para modelos de pequena escala, como pequenas plantas industriais.

Acredita-se que avaliar os erros de um modelo de predição permite identificar imprecisões dos métodos e analisar a eficácia da metodologia adotada. Para definição de ajustes no modelo de cálculo é coerente repetir o procedimento de simulação em inúmeros cenários similares [7].

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos pelas medições sonoras e simulações acústicas utilizando os métodos de cálculo avaliados, nos locais próximos às ruas e nas fachadas. Os diagramas mostrados na Figura 3 ilustram a dispersão dos valores das diferenças entre os níveis de pressão sonora medidos - L_{Mi} - e simulados - L_{Si} - para cada método de cálculo, em valores absolutos. Os indicadores estatísticos de erro e coeficiente de correlação de Pearson, obtidos pela comparação dos resultados da simulação, são apresentados na Tabela 4.

Tabela 3: Resultados obtidos nas medições e simulações sonoras.

Posição	Medição	Simulação									
		ISO9613+ RMV-SRM2		CRTN		NMPB		Harmonoise		CNOSSOS	
		L_M (dB)	L_S (dB)	L_S-L_M	L_S (dB)	L_S-L_M	L_S (dB)	L_S-L_M	L_S (dB)	L_S-L_M	L_S (dB)
FHA 1	64,7	68,8	4,1	73,2	8,5	68,9	4,2	63,8	-0,9	66,1	1,4
FHA 2	63,0	67,3	4,3	71,7	8,7	67,4	4,4	61,1	-1,9	64,6	1,6
FHA 3	61,0	63,9	2,9	68,6	7,6	63,8	2,8	57,3	-3,7	60,8	-0,2
FHB 1	63,0	67,3	4,3	70,5	7,5	67,7	4,7	63,0	0,0	65,1	2,1
FHB 2	62,3	65,0	2,7	69,4	7,1	65,9	3,6	61,2	-1,1	63,2	0,9
FHB 3	61,4	63,0	1,6	67,7	6,3	63,8	2,4	59,0	-2,4	61,0	-0,4
PM1	66,7	71,9	5,2	78,1	11,4	72,2	5,5	69,9	3,2	69,6	2,9
PM2	61,3	73,0	11,7	73,5	12,2	71,6	10,3	70,4	9,1	69,4	8,1
PM3	65,2	70,6	5,4	73,9	8,7	69,1	3,9	68,6	3,4	67,6	2,4
PM4	69,1	75,9	6,8	79,1	10,0	74,8	5,7	73,8	4,7	71,7	2,6
PM5	71,7	80,6	8,9	84,0	12,4	80,4	8,7	79,5	7,8	77,8	6,2
PM6	71,2	77,8	6,6	80,7	9,5	77,0	5,7	75,3	4,0	75,5	4,2
PM7	69,8	77,1	7,3	81,0	11,3	76,3	6,5	76,1	6,3	75,7	5,9
PM8	65,7	76,6	10,9	80,7	15,0	74,9	9,2	74,7	9,0	72,6	6,9
PM9	63,6	73,4	9,8	75,7	12,1	72,0	8,4	71,8	8,2	70,0	6,4

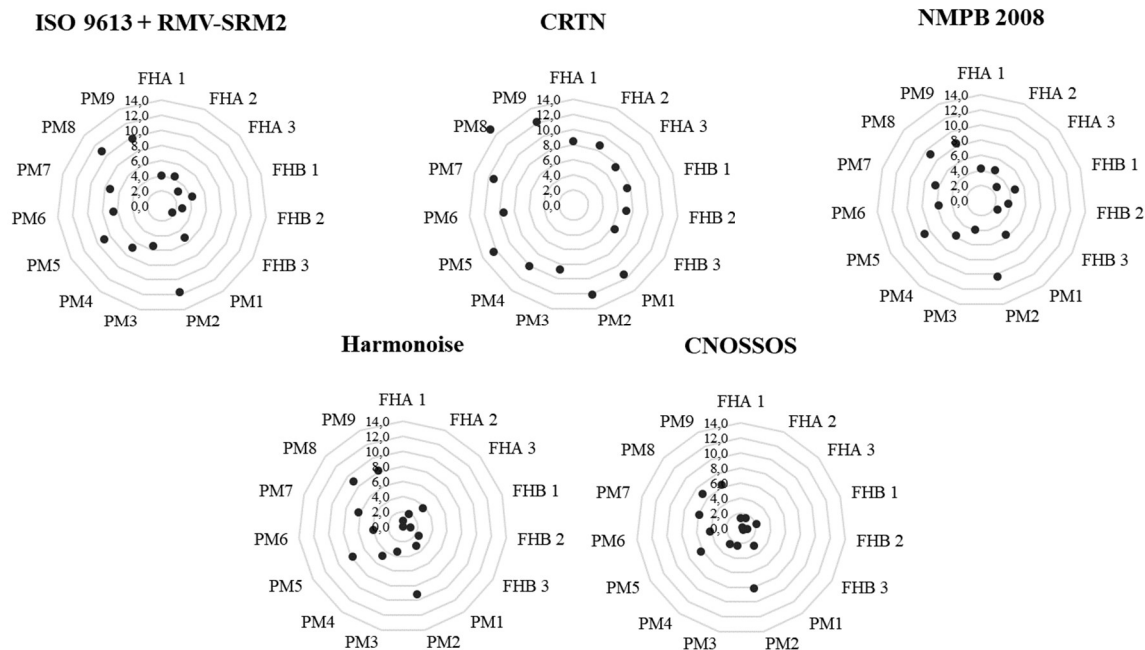


Figura 3: Diagramas com dispersão das diferenças entre valores medidos e simulados do nível de pressão sonora em cada ponto de medição.

Tabela 4: Indicadores de erro e coeficiente de correlação das simulações acústicas para cada método de cálculo utilizado.

Indicador	ISO9613	CRTN	NMPB 2008	Harmo noise	CNOSSOS
ME	6,15	9,89	5,75	3,06	3,40
MEA	6,15	9,89	5,75	4,38	3,47
r	0,85	0,90	0,89	0,83	0,88

Analisando os resultados obtidos pelas simulações acústicas, é possível identificar o método CNOSSOS como o que melhor reproduziu o cenário das medições sonoras realizadas no local de estudo, apresentando menores erros e um bom coeficiente de correlação.

Os valores encontrados também evidenciaram que o modelo de simulação superestima a emissão sonora das vias de tráfego, em parte, em razão da estratégia de caracterizar as motocicletas como veículos pesados. Neste aspecto, se faz necessária uma abordagem mais criteriosa na caracterização do tráfego, bem como uma análise da equivalência da emissão sonora dos veículos que trafegam nas cidades brasileiras com os métodos de cálculo utilizados, uma vez que os dados mais

relevantes nos modelos de simulação de ruído ambiental são aqueles necessários para o cálculo de emissão sonora do ruído de tráfego, com destaque para composição e fluxo de veículos [31, 32].

A simulação acústica utilizando o método CRTN apresentou os maiores erros na comparação com os valores das medições, entretanto, os valores simulados e medidos apresentaram uma boa correlação. Neste caso, é importante ressaltar que o CRTN foi desenvolvido em 1988, quando os veículos emitiam ruídos mais elevados, e o foco principal era avaliar o entorno de rodovias com tráfego constante e com maiores velocidades.

Comparando os modelos NMPB e CNOSSOS, foi observada uma correlação similar, entretanto, os erros da simulação pelo modelo francês são maiores, provavelmente em função do cálculo da potência sonora dos veículos, uma vez que o modelo de propagação sonora dos dois métodos é praticamente idêntico.

Identificou-se também que existe uma tendência para a dispersão das diferenças entre L_{Si} e L_{Mi} nos pontos próximos às ruas e outra tendência na comparação entre os resultados obtidos nos



pontos das fachadas. Visto isto, os indicadores estatísticos dos modelos também foram calculados separadamente para os pontos na fachada e para os pontos nas ruas, apresentados na Tabela 5. Como exemplos, a Figura 4 ilustra a diferença da dispersão nos pontos próximos às vias de tráfego e nas fachadas, dos métodos ISO 9613/1-2 e CNOSSOS.

Tabela 5: Indicadores de erro e coeficiente de correlação das simulações acústicas para os métodos de cálculo avaliados, separados entre pontos na fachada e pontos nas ruas.

		ISO9613	CRTN	NMPB 2008	Harmo-noise	CNOSSOS
Fachadas	ME	3,31	7,64	3,69	-1,65	0,90
	MEA	3,31	7,64	3,69	1,65	1,10
	<i>r</i>	0,95	0,95	0,96	0,93	0,96
Ruas	ME	8,05	11,39	7,11	6,20	5,06
	MEA	8,05	11,39	7,11	6,20	5,06
	<i>r</i>	0,76	0,86	0,82	0,76	0,82

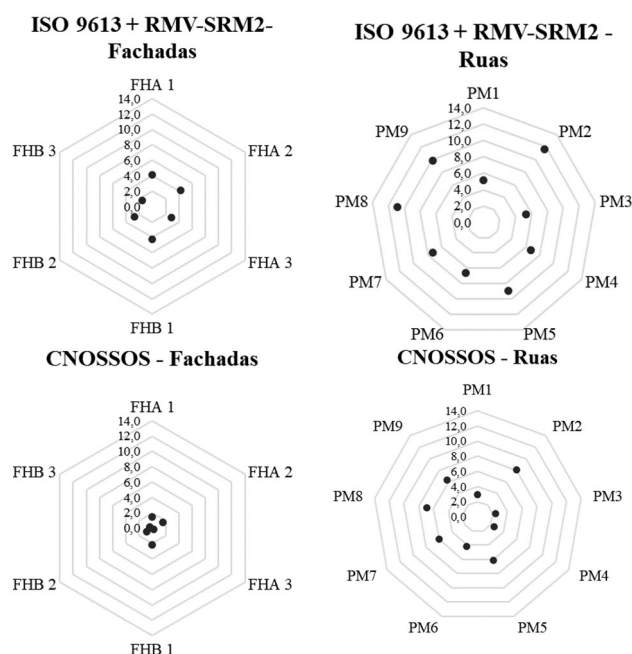


Figura 4: Diagramas indicando as diferenças entre L_{Si} e L_{Mi} , em valores absolutos, analisadas separadamente para os pontos na fachada e para os pontos nas ruas - métodos ISO9613+ RMV-SRM2 e CNOSSOS.

De maneira geral, os erros encontrados são consideravelmente maiores nos pontos analisados próximos às ruas, além dos coeficientes de correlação serem

consideravelmente menores. Possivelmente, isto se deve às imprecisões dos modelos das fontes sonoras, com parâmetros sensíveis, como condições de aceleração/desaceleração/paradas, desconsiderados. Adicionalmente, cogita-se que a proximidade dos pontos de medição das fontes sonoras não é a melhor alternativa para validação das simulações de ruído ambiental urbano. Alguns métodos especificam que o uso dos cálculos se aplica somente para locais com distâncias mínimas de 10 m da fonte.

As diferenças encontradas entre L_{Si} e L_{Mi} podem também ter sido consequência da negligência de algum efeito importante de propagação sonora, como o efeito do vento e presença de fontes sonoras mais distantes (apesar de não identificadas durante as medições), subestimando os resultados.

Na análise dos resultados obtidos pelo método Harmonoise, é observado que os valores simulados são menores que os medidos nas fachadas, provavelmente devido a sua maior sensibilidade aos dados geométricos inseridos no modelo, como indicado por Cueto e Licitra [33]. É possível concluir também que a maior complexidade do cálculo de propagação deste método não se reflete na qualidade dos resultados encontrados, como já elucidado por Dutilleux [25].

Outro fator importante para a discrepância entre os resultados das simulações e medições sonoras é o fato de que dos métodos utilizados foram elaborados com base em contextos diferentes da realidade encontrada no estudo de caso analisado e repetições de simulações de cenários similares podem contribuir melhor a aferir a qualidade dos métodos de cálculo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os erros encontrados na comparação entre os níveis de pressão sonora simulados e medidos evidenciam a necessidade de revisão da metodologia adotada para construção do modelo, assim como a calibração dos valores das emissões sonoras das fontes de ruído de tráfego. Com relação aos métodos de cálculos avaliados, o CNOSSOS foi identificado como o melhor estimador de níveis de pressão sonora de ruído ambiental do estudo de caso analisado.

Adicionalmente, conclui-se que para a validação dos modelos de simulação é importante comparar com valores medidos em diferentes alturas em relação ao solo, assim como em pontos em diversas distâncias das principais fontes de ruído.

Por fim, concluiu-se que uso de simulações acústicas é uma ferramenta importante para análise da exposição ao ruído das edificações e para tomada de decisões de projeto de edifícios de múltiplos pavimentos. No entanto, acredita-se que maiores investigações dos métodos de cálculo de ruído de tráfego e metodologias para construção de modelos de simulação, considerando o contexto de cidades brasileiras, serão relevantes para padronização de práticas com tais ferramentas, na busca qualidade adequada dos resultados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pelo financiamento do desenvolvimento da pesquisa deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Associação Brasileiras de Normas Técnicas. ABNT NBR 15575-4:2013 Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE, 2013.
- [2] Proacustica, Associação Brasileira para a Qualidade Acústica. Manual ProAcústica sobre a Norma de Desempenho. Rush Gráfica e Editora Ltda., São Paulo (Brasil), 2ª ed., 2015.
- [3] Brasil. Ministério das Cidades-Secretaria Nacional De Habitação. Especificações de desempenho nos empreendimentos de HIS baseadas na NBR 15575 – Edificações Habitacionais – Desempenho: Orientações ao proponente para aplicação das Especificações de Desempenho em Empreendimentos de HIS, 27 Ago. 2015.
- [4] Barrigón Morillas *et al.*, A review of the measurement procedure of the ISO 1996 standard. Relationship with the European Noise Directive. Science of the Total Environment, 565: 595-606, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.207>
- [6] Cunha, I. *et al.* Guidelines for noise classification methods of residential building, according to Brazilian standard ABNT NBR 15575-4. In: 22nd International Congress on Acoustics, Buenos Aires, 2016.
- [7] Probst, W. Calculation of sound propagation with highly reflective environments. In: Internoise 2014. Melbourne, 2014.
- [8] Guedes, I. C. M; Bertoli, S. R., Mapa acústico como ferramenta de avaliação de ruído de tráfego veicular em Aracaju - Brasil. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, 5(2): 40-51, jul./dez. 2014.
- [9] Brasileiro, T. C., Mapeamento Sonoro: Estudo do Ruído urbano no Bairro Castelo Branco, em João Pessoa/PB, 2017. Dissertação. (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.
- [10] Souza *et al.*, Mapeamento acústico do bairro Imbuí, Salvador-BA. In: XXV Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica – Sobrac 2014, Campinas, 2014.
- [11] Cortês, M. M.; Niemeyer, M; L., O potencial da utilização da ferramenta de mapa de ruído em diferentes escalas de análise. IN: XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Encac 2013. Brasília, 2013.
- [12] Fieldler, P. E. K., Poluição sonora nos eixos estruturais de transporte da cidade de Curitiba – PR. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental da Universidade Federal do Paraná), Curitiba, 2013.
- [13] Giunta, M. B., Análise de modelagem de previsão acústica e mapeamento sonoro para cidade de São Carlos - SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos), São Carlos, 2013.
- [14] Gazolla, D. A.; Vecchi, M.A.; Pavanello, L. G., Impactos do tráfego veicular nos níveis de ruído urbano: o mapeamento sonoro como instrumento de análise. In: Acústica 98, Lisboa, 1998.
- [15] UE - União Europeia, Directiva 2002/49/EC do Parlamento Europeu e do Conselho de 25 de junho de 2002. Relativa à avaliação e gestão do ruído ambiente. Jornal Oficial das Comunidades Europeias. N. L 189/12, 2002.
- [16] UE - União Europeia, Diretiva (UE) 2015/996 da Comissão de 19 de maio de 2015 que estabelece métodos comuns de avaliação do ruído de acordo com a Diretiva 2002/49/CE do Parlamento Europeu e do Conselho (atos não legislativos), 2015.
- [17] Suárez, E.; Barros, J. L. Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile. Science of the Total Environment. 466-467: 539-546, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.013>.
- [18] Ramírez, A.; Domínguez, E. Modeling urban traffic noise with stochastic and deterministic traffic models. Applied Acoustics, 74: 614–621, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2012.08.001>.
- [19] Kurra, S.; Dal, L. Sound insulation design by using noise maps. Building and Environment, 49: 291-303, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.07.006>.



- [20] Oliveira Filho, M. V. M.; Zannin, P.H.T. Methodology for assessing the sound insulation of the facade of a multiple floor building. *Noise Control Engineering Journal*, 63 (2): 152-158, 2015. <https://doi.org/10.3397/1/376314>.
- [21] International Standardization Organization, ISO 9613-2. *Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*. Genebra, 1996.
- [22] United Kingdom. Department of Transport, Welsh Office. *Calculation of Road Traffic Noise*. Londres: HMSO, 1988.
- [23] França. SETRA - Service d'études sur les transport, les routes et leurs aménagements, *Road noise prediction: 1 Calculating sound emissions from road traffic*, Paris: Éditions Sétra, 2009.
- [24] França. SETRA - Service d'études sur les transport, les routes et leurs aménagements, *Road noise prediction: 2 -Noise propagation computation method including meteorological effects (NMPB2008)*, Paris: Éditions Sétra, 2009.
- [25] Dutilleul, G. *Road Traffic Noise*. In: Licitra, G (Ed.), *Noise Mapping in the EU: models and Procedures*. Boca Raton: CRC Press, 2013. 55-79. ISBN 9780367865238.
- [26] Beuving, M.; Vos, P., *State of the Art. Deliverable 2 of IMAGINE Project*, Aea Technology Rail Bv report IMA10TR-040423-AEATNL32, Utrecht: 14th October 2004.
- [27] Willmott, C. J. *et al*, *Statistics for the Evaluation and Comparison of Models*. *Journal of Geophysical Research*, 90 (C5): 8995-9005, 1985.
- [28] Probst, W., *Uncertainty and quality assurance in simulation software*. In: Licitra, G (Ed.), *Noise Mapping in the EU: models and Procedures*. Boca Raton: CRC Press, 2013. 181-211. ISBN 9780367865238.
- [29] European Commission working group assessment of exposure to noise (WG-AEN). *Good practice guide for strategic noise mapping and the production of associated data on noise exposure. Position Paper WG-AEN 004-2007, Versão 2*, 13th August 2007.
- [30] Manvell, D; Hartog van Banda, E., *Good practice in use of noise mapping software*. *Applied Acoustics*, 72: 527-533, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2010.10.002>.
- [31] Licitra, G.; Ascari, E., *The good practice guide, version 2*. In: Licitra, G (Ed.), *Noise Mapping in the EU: models and Procedures*. Boca Raton: CRC Press, 2013. 159-178. ISBN 9780367865238.
- [32] Hepworth, P., *An overview of the impact of source data accuracy variations on the overall accuracy of noise maps*. 14TH International Congress on Sound and Vibration. Cairns, 2007.
- [33] Cueto, J.L; Licitra, G, *Geographic information system tools for noise mapping*. In: Licitra, G (Ed.), *Noise Mapping in the EU: models and Procedures*. Boca