



XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído

XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído

JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

AVALIAÇÃO DA PRECISÃO DE ALGORITMOS DE PREDIÇÃO DO RÚIDO DE TRÁFEGO

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito (1); Caroline Seriani (2)

(1) Professor Doutor, lapfbrito@gmail.com, Universidade de Taubaté, Programa de Pós Graduação em Planejamento e Desenvolvimento Regional, Rua Visconde do Rio Branco, 210, Centro, Taubaté-SP – Brasil, CEP: 12020-040, 12 33073431

(2) Aluna de graduação do Departamento de Arquitetura, cahseriani@hotmail.com, Universidade de Taubaté - Programa de Iniciação Científica, Rua Visconde do Rio Branco, 210, Centro, Taubaté-SP – Brasil, CEP: 12020-040, Tel.: (12) 3625-4151

RESUMO

A poluição sonora já é considerada como a segunda maior fonte de poluição ambiental nos aglomerados urbanos sendo fonte de incômodo, e em certos casos, doenças para a população em geral. A principal fonte de ruído nas cidades é o tráfego rodoviário, sendo este importante para a mobilidade da população e está presente em todas as regiões, centrais e periféricas. O planejamento urbano possibilita a organização das cidades, e neste caso, agrega uma melhora na convivência da população com a poluição sonora. Os mapas acústicos são uma ferramenta útil para o planejamento urbano, mas não são acessíveis a todos devido ao custo e complexidade de conhecimento necessário para sua utilização. Uma alternativa são os algoritmos matemáticos obtidos na literatura, e portanto livres para o uso, que simulam o ruído de tráfego. Mas estes podem estar desatualizados e não representam a realidade brasileira. Este trabalho tem por objetivo avaliar a precisão de um grupo de algoritmos na realizada brasileira de tráfego rodoviário. Foram utilizados dados de medição de oito trabalhos totalizando 213 medições em várias partes do Brasil. Os resultados obtidos indicam que não há uma boa precisão nos resultados com uma variação de precisão com o aumento ou redução no volume de tráfego e velocidade. Foram testados índices de correção que possibilitaram uma precisão de 93% dos resultados.

Palavras-chave: Ruído de tráfego, planejamento urbano, poluição sonora.

ABSTRACT

Noise pollution is already considered as the second largest source of environmental pollution in cities and is a source of nuisance, and in certain cases, diseases for population. The main source of noise in cities is road traffic, which is important for the mobility. Urban planning can organize cities, and in this case, improves the coexistence of population with noise pollution. Acoustic maps are a useful tool for urban planning but are not accessible to all because of the cost and complexity of knowledge required for their use. An alternative is the mathematical algorithms obtained in the literature, and therefore free to use, that simulate traffic noise. But these may be outdated and do not represent the Brazilian reality. This work aims to evaluate the accuracy of a group of algorithms in the Brazilian highway traffic. There were used data from eight studies totaling 213 measurements in various parts of Brazil. The obtained results indicate that there is not a good precision in the results with a variation of precision with the increase or reduction in the volume of traffic and speed. Correction indices were tested, which allowed an accuracy of 93% of the results.

Keywords: Traffic noise, urban planning, noise pollution.

1. INTRODUÇÃO

A União Europeia trata a exposição ao ruído ferroviário, industrial, de rodovias e aeronáutico como um importante problema ambiental por causar efeitos adversos na qualidade de vida das pessoas e comprometer o seu bem-estar (LAWTON; FUJIWARA, 2016). A Organização Mundial da Saúde (WHO, 2009) considera o ruído como a segunda maior fonte de poluição ambiental podendo ser causa stress, irritabilidade e insônia. Estima também que a cada ano na Europa Ocidental um milhão de pessoas saudáveis tem sua saúde comprometida por algum distúrbio proveniente da poluição sonora (WHO, 2011). Nos Estados Unidos e na Europa 26% das pessoas tem alguma deficiência auditiva bilateral com capacidade de se comunicar comprometida em ambientes fechados e barulhentos (BASNER, 2014). Dessa forma o ruído urbano tornou-se uma importante fonte de poluição com efeitos na saúde como hipertensão, estresse e dificuldades de aprendizagem em crianças (MURPHY, 2014). Um dos principais motivos da ação perniciosa do ruído na população é devido seus efeitos não serem imediatos, exceto o incômodo, gerando perda gradativa da audição (MARQUES, 2015). Com a persistência, pode causar alterações físicas, mentais e emocionais, afeta o rendimento no trabalho, interfere negativamente na comunicação das pessoas. A redução da performance cognitiva é outro grave problema encontrado na literatura. Estudos realizados com crianças mostram que quando expostas a níveis de ruído elevados têm suas habilidades de aprendizado, leitura, memória e atenção comprometidas (MARQUES, 2015). Exposições excessivas de longa duração, como a gerada pelo ruído de grandes avenidas, pode ser relacionada com incidência de diabetes (SØRENSEN et al., 2013).

Uma das principais fontes de ruído urbano é o gerado pelo tráfego de veículos. Nas cidades de médio e grande porte as dificuldades de mobilidade no período diurno têm elevado o fluxo de veículos, principalmente os pesados, no período noturno com o conseqüente acréscimo no nível de ruído urbano justamente no horário de descanso da maioria da população (BRITO, 2009). O ruído gerado pelo tráfego de veículos é uma fonte de incômodo em cidades de pequeno porte como relatado por Scherer, Piageti e Vani (2008), em cidades de médio porte segundo conclusões de Giunta, Souza, Viviani, (2012) e Silva, Oliveira Junior e Oiticica (2017) e também da já esperada influência nas cidades de grande porte (NIEMYER e CORTÊS, 2012). Esteves et al. (2013) estimaram perdas da ordem de €13 a €38 milhões no ano de 2001 na atividade econômica de turismo na Europa devido a poluição sonora. Brito e Barbosa (2014), em estudo sobre o conflito de interesses entre os turistas que procuram o lazer e os turistas e moradores locais que procuram o descanso, concluíram que o excesso de ruído gerado pelas atividades turísticas atrapalha as atividades diárias de uma estância. Łowicki e Piotrowska (2015) pesquisaram a relação da desvalorização imobiliária na Polônia e o excesso de ruído e concluíram que há um decréscimo médio no preço das edificações de cerca de 2,9% por dB de acréscimo no critério de ruído normalizado, conclusões semelhantes também foram obtidas por Ivanovic et al (2014) e Szczepanska et al (2015).

A norma brasileira que disserta sobre ruído urbano é a NBR 10151, Avaliação de ruídos em áreas habitadas visando o conforto da comunidade (ABNT, 2000). Segundo Schmitt (2014) em Porto Alegre, Aleixo, Constantino e Carvalho (2014) em Goiânia e Guedes, Kohler e Carvalho (2014) em Aracaju, Silva, Oliveira Junior e Oiticica (2017) em Maceió, o ruído urbano influenciado pelo tráfego de veículos supera os limites da NBR 10151 (ABNT, 2000).

O planejamento urbano é essencial para a redução dos efeitos do ruído na população em geral, sendo responsável pela qualidade de vida das cidades, e a mobilidade está inserida neste contexto. A população em geral convive com a mobilidade urbana, diretamente ligada ao tráfego de veículos automotores, principal matriz de transporte do Brasil, não podendo simplesmente ser eliminada (BRITO e TOLEDO, 2017). Cidades de pequeno e médio porte, em algumas situações, são cortadas por rodovias, e cidades de médio e grande porte, podem possuir anéis de circulação e grandes avenidas. O nível de pressão sonora gerado nestas vias de circulação, pode ser obtido diretamente por algoritmos matemáticos que não consideram as reflexões sonoras geradas pelas fachadas dos edifícios, em função do volume de tráfego e velocidade (ZHAO et al, 2015). O nível de pressão sonora gerado em uma via é uma informação fundamental para definir, por exemplo, a distância adequada de bairros residências, hospitais, escolas e outros receptores sensíveis.

O processo de licenciamento ambiental pode auxiliar os gestores públicos no planejamento urbano, pois possibilita a antevista dos futuros impactos de um empreendimento com potencial para gerar efeitos negativos à população, de diversas formas, entre elas, a geração e propagação do ruído. Para tal são necessárias ferramentas matemáticas que possibilitem a predição futura do ruído gerado por uma via de tráfego de maneira que possa ser confrontada com a normalização. Os mapas acústicos possibilitam tal análise e são produzidos por *softwares* de maneira a representar de forma clara a paisagem acústica de um local, como os obtidos por Brasileiro e Dantas Araújo (2017) e também simular a evolução do ruído urbano para uma data futura como o realizado por Costa et al (2017).

Os *softwares* comerciais que simulam o mapa acústico de uma região, a despeito de serem fundamentais para o planejamento urbano, possuem um custo elevado o que inviabiliza de certa forma sua

utilização nas cidades de pequeno e médio porte, ou em projetos de pequeno orçamento, mas que podem ser impactantes na geração do ruído ambiental. Os *softwares* requerem também certo grau de habilidade e conhecimento na área de informática e acústica ambiental. Desta forma os algoritmos matemáticos disponíveis gratuitamente na literatura podem suprir essa lacuna preservando a qualidade de vida da população lindeira a vias e rodovias. Os algoritmos são indicados para cálculos mais simples, onde as reflexões de fachadas não são consideradas, por exemplo, mas que ao mesmo tempo possibilita obter valores do nível de ruído gerado por uma via em função principalmente do volume de tráfego e velocidade dos veículos. Estes, em sua maioria, são desenvolvidos em outros países com realidades diferentes do Brasil, seja no tipo e conservação do pavimento, tipo e conservação dos veículos e maneira de dirigir. Desta forma é necessário saber quais desses algoritmos melhor se adaptam a realidade brasileira.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar a precisão dos algoritmos matemáticos para determinação do nível de pressão sonora gerado pelo tráfego rodoviário brasileiro.

3. MÉTODO

Os algoritmos avaliados na realidade brasileira de tipologia de veículos, condições de via e modo de dirigir são os apresentados por Brito, Carvalho Jr e Toledo (2018) que serão retomados brevemente neste trabalho. A principal característica desses algoritmos é estarem disponíveis na literatura gratuitamente e já terem sido testados em seus países de origem. Outros algoritmos mais novos, e provavelmente mais precisos, não são abertos para o uso, não cabendo dessa forma na proposta desse trabalho.

O *Her Majesty's Stationery Office* (HMSO, 1988), do Departamento de Transportes do Reino Unido é apresentado pela Equação 1. O nível de pressão sonora é obtido para uma distância de 13,5 metros da lateral da via. Como a Equação 1 fornece o nível estatístico L_{10} (onde apenas 10% das medidas instantâneas obtidas no período de integração superam este valor) deve-se, através da Equação 2, obter o $L_{Aeq(1h)}$, conforme proposto por Alexandre e Barde (1975). Na Equação v é a velocidade dos veículos em km/h, n o fluxo total de veículos em v/h e p a quantidade de veículos pesados em relação aos leves (%). Neste algoritmo não está demonstrada a parcela que considera a declividade da via, pois não faz parte do objetivo deste trabalho. O nível de ruído gerado pelo tráfego de veículos depende do tipo de pavimento. As equações de correção podem ser obtidas em HMSO (1988).

$$L_{10} = 10 * \log n + 33 * \log \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \log \left(1 + \frac{5 * p}{v} \right) - 26,6 \quad [1]$$

$$L_{Aeq(1h)} = L_{10} - 3 \quad [2]$$

O algoritmo apresentado pela Equação 3 foi adaptado por Lam e Tam (1998) do original da HMSO (1988). Para o cálculo do L_{Aeq} também é necessário utilizar a Equação 2 e também devem ser feitas as correções para tipo de pavimento e função da velocidade conforme descrito em HMSO (1988). Tang e Tong (2004) também propuseram uma adaptação no algoritmo proposto por HMSO (1988) para obtenção diretamente do L_{Aeq} , Equação 4, sendo que neste caso não é necessária a correção para o tipo de pavimento pois já foi considerado o betuminoso.

$$L_{10} = 10,5 * \log n + 34,8 * \log \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10,5 \log \left(1 + \frac{5 * p}{v} \right) - 34,4 \quad [3]$$

$$L_{Aeq(1h)} = 10 * \log n + 41,8 * \log \left(v + 40 + \frac{500}{v} \right) + 10 \log \left(1 + \frac{5 * p}{v} \right) - 50,5 \quad [4]$$

O algoritmo proposto pela *Federal Highway Administration* (FHWA, 1998) é apresentado pela Equação 5. Este calcula o nível de pressão sonora equivalente ($L_{Aeq(1h)}$) para um período de uma hora, para um observador a 15 m do eixo central da via, baseado no nível de ruído máximo (L_{max}) obtido durante a passagem de uma dada categoria de veículo pelo período de 5 s (L_{5s}), sendo n o número de veículos que transitam por hora, v/h, para a categoria de veículo considerada, v a velocidade em km/h do veículo, d a distância entre o ponto de análise o centro da via, t o tempo de análise, em geral uma hora, e α o coeficiente que considera o tipo de solo. As equações para o cálculo do L_{5s} podem ser obtidas em FHWA (1998). O $L_{Aeq(1h,i)}$ deve ser calculado para cada categoria, automóveis e caminhões, por exemplo, ($L_{5s,z}$ para z categorias) e todos os resultados devem ser somados na forma logarítmica por meio da Equação 6.

$$L_{Aeq(1h,i)} = L_{5s,z} + 10 \log \left(\frac{n}{v * t} \right) + 10 \log \left(\frac{15}{d} \right)^{(1+\alpha)} - 13 \quad [5]$$

$$L_{Aeq(Total)} = \sum_{i=1}^z 10 * \text{Log} \left(10^{\left(\frac{L_{Aeq,i}}{10} \right)} \right) \quad [6]$$

Uma das dificuldades desse modelo é a obtenção do ruído de passagem do veículo por um período de 5 s ($L_{5s,z}$). Tansatcha et al (2005) propuseram um modelo matemático, Equação 7, baseado não no L_{max} , obtido em um período de 5 s, gerado por uma dada categoria de veículos, mas no L_{Aeq} , em um período de 10 s facilitando a obtenção do ruído de passagem, já que o valor obtido em medições de campo do L_{5s} , pode não ser preciso devido a dificuldade de acionar o medidor de ruído exatamente 2,5 s antes da passagem do veículo, ou seja, apesar do final da medição ser facilmente determinada (2,5 após a passagem do veículo defronte ao medidor) o início não é. Outro fator determinante de erros nesta metodologia são os veículos longos e lentos que demoram mais de 5 s para passar defronte ao medidor. O cálculo do $L_{eq10s,i}$ é feito por equações baseadas na categoria e velocidade de cada veículo e podem ser obtidas em Tansatcha et al (2005). O coeficiente β_{ef} também é obtido no mesmo autor e representa o efeito da absorção das ondas sonora devido a rigidez do solo. Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008), Equação 8, e Zhao et al. (2015), Equação 9 propuseram modelos baseados no tempo de medição inicial de 20 s ($L_{20s,i}$) para uma melhor amostra dos veículos longos além de reduzir o erro no tempo de medição. Os valores de L_{20s} são os fornecidos por Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008). Ambos os algoritmos consideram d_0 igual a 15 m; Para se obter o $L_{Aeq(total)}$ utiliza-se a Equação 6.

$$L_{Aeq(1h,i)} = L_{10s,i} + 10 \log \left(\frac{15}{d} \right)^{\beta_{ef}} + 10 \log n_i - 25,563 \quad [7]$$

$$L_{Aeq(1h,i)} = L_{20s,i} + 10 \log \left(\frac{d_0}{d} \right)^{\alpha} + 10 \log n_i - 22,553 \quad [8]$$

$$L_{Aeq(1h,i)} = L_{20s,z} + 10 \log \left(\frac{d_0}{d} \right)^{\alpha} + 10 \log n_i + 10 \log \left(\frac{\Delta \varphi}{\Pi} \right) - 22,55 \quad [9]$$

A norma alemã, *Guideline for Noise Prediction on Streets RLS 90* (RLS 1990) propõe o algoritmo dado pela Equação 10 para um período de 1 hora, a 25 m de distância, contados a partir do eixo central da via, sendo necessária a correção devido a velocidade e tipo de pavimento conforme descrito na publicação. Outras formulações são a desenvolvida pelo *Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR* (COCHI, FARINA e LOPES, 1991), Equação 11, que é derivada do algoritmo RLS 90. Este algoritmo precisa ser corrigido de acordo com a velocidade dos veículos e o tipo de pavimento conforme apresentado pelos autores, sendo n_l e n_p o fluxo de veículos leves e pesados por hora, d_0 a distância de referencia de 25 m. Os coeficientes α e β são referentes a emissão de ruído de veículos leves e pesados respectivamente, podendo ser alterados dentro de cada realidade. No modelo padrão italiano os valores de α e β são 35,1 e 6 respectivamente.

$$L_{Aeq(1h)} = 37,3 + 10 * \log[n * (1 + 0,082 * p)] \quad [10]$$

$$L_{Aeq(1h)} = \alpha + 10 * \log(n_l + \beta * n_p) - 10 * \log(d / d_0) \quad [11]$$

Para alimentar os algoritmos selecionados foi realizada uma pesquisa bibliográfica em trabalhos publicados sobre o ruído de tráfego em diferentes cidades do Brasil, que fornecessem a contagem de veículos leves e pesados, a velocidade considerada na via e a distância entre a via e o sonômetro. Após a tabulação dos dados o L_{Aeq} apresentado nos trabalhos foi calculado para uma distância de 15 m sendo esta padrão para todo pesquisa. Os dados foram inseridos nos algoritmos e transformados em gráficos para a melhor visualização dos resultados.

4. RESULTADOS

A pesquisa bibliográfica realizada identificou 23 artigos publicados em anais de congressos, revistas especializadas e em programas de pós-graduação que tratam do ruído de tráfego no Brasil. Deste foram utilizados os dados de oito trabalhos, pois os demais não apresentavam todas as informações necessárias como a contagem de veículos (leves, motocicletas, caminhões e ônibus), velocidade de tráfego, distância da medição em relação ao eixo da via ou de sua lateral e nível de pressão sonora obtido. Os trabalhos utilizados foram os de Calixto (2002) realizado no Estado do Paraná, Kawakita (2008) no Estado de São Paulo, Pais et al (2012) no Estado do Paraná, Pinto (2013) no Estado do Rio Grande do Norte, Melo et al (2015) no Estado da Paraíba, Silva, Oliveira Junior e Oiticica (2017) no Estado de Alagoas e Brito e Toledo (2017) e Bécard et al (2017) no Estado de São Paulo. Ao todo foram selecionadas 215 medições das quais 2 foram descartadas pois a diferença entre o nível de pressão sonora simulado e o medido era superior a 10 dB, indicando a

possibilidade de erro na medição ou contagem dos veículos. Em todos os algoritmos foram utilizados os fatores de correção para o pavimento asfáltico, normalmente utilizado no Brasil, quando pertinente.

As Figuras 1 a 3 apresentam a relação entre o nível de pressão sonora simulado e o medido com os algoritmos da HMSO (1988), Equações 1 e 2, as correções propostas por Lam e Tam (1998), Equação 2 e 3, no modelo da HMSO (1988), e as correções propostas por Tang e Tong (2004), Equação 4, também no algoritmo da HMSO (1988). As retas vermelhas indicam uma faixa de tolerância de ± 2 dB. Nos três algoritmos testados há uma tendência de subestimar os valores simulados em relação aos medidos (pontos acima das duas linhas vermelhas) principalmente com o aumento do volume de tráfego (ângulo de inclinação da linha de tendência maior que 45°). Observa-se também um índice de correlação (R^2) baixo o que indica uma dispersão dos resultados.

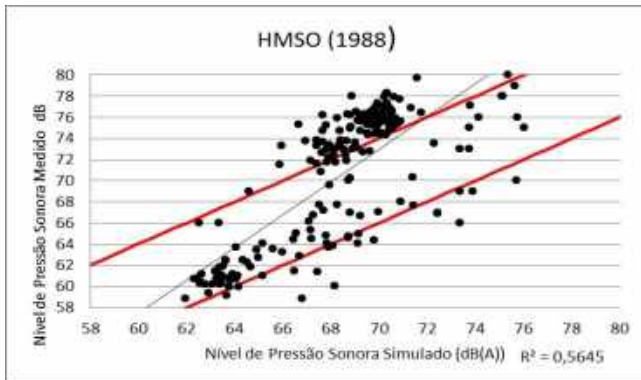


Figura 1 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo HMSO (1998)

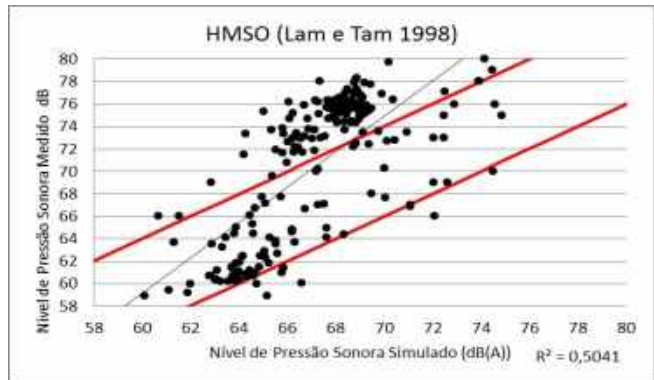


Figura 2 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo HMSO (1998) com as correções propostas por Lam e Tam (1998)

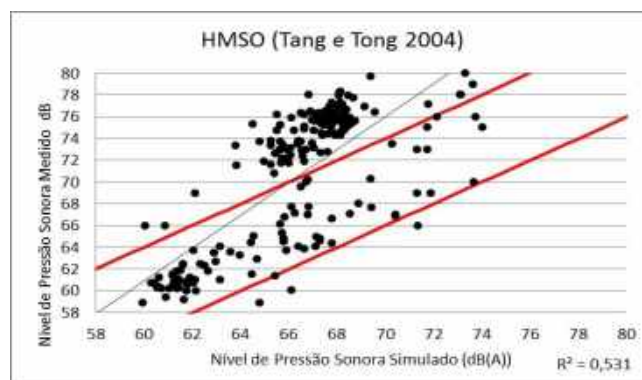


Figura 3 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo HMSO (1998) com as correções propostas por Tang e Tong (2004)

As Figuras 4 a 6 apresentam os resultados baseados nos algoritmos que adotam o ruído de passagem dos veículos como método de avaliação. Nesta metodologia se calcula o nível de pressão sonora durante a passagem do veículo em um dado período, que posteriormente é aplicado no algoritmo proposto. O processo se repete para cada categoria de veículos. O resultado final é a soma logarítmica de cada uma das categorias como indicado na Equação 6. Tansatcha et al (2005), Equação 7, propõe um tempo de medição de 10 s (L_{10s}) e Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008), Equação 8, e Zhao et al. (2015), Equação 9 um tempo de medição de 20s (L_{20s}). Tansatcha et al (2005) mostra uma tendência de superestimar os resultados simulados com o volume de tráfego mais baixo (pontos abaixo das duas linhas vermelhas), invertendo a tendência com o aumento do fluxo (ângulo de inclinação da linha de tendência maior que 45°). O mesmo acontece, mas em menor intensidade com Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008) o que possibilitou mais resultados simulados dentro do limite de ± 2 dB representados pelas linhas vermelhas. Os resultados obtidos no algoritmo de Zhao et al. (2015) apresenta um comportamento similar ao de Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008), inclusive com índices de correlação (R^2) similares, o que comprova que um tempo maior na obtenção do ruído de passagem dos veículos (L_{20s} ao invés de L_{10s}) melhora a precisão destes algoritmos. Mas os algoritmos que calculam o nível de ruído durante a passagem de uma categoria de veículo foi determinado por regressão linear de uma amostra que pode ser representativa quanto às características dos veículos daquele país, mas não do Brasil. Esses algoritmos base para cada categoria de veículos podem ser obtidos diretamente com nas referências citadas.

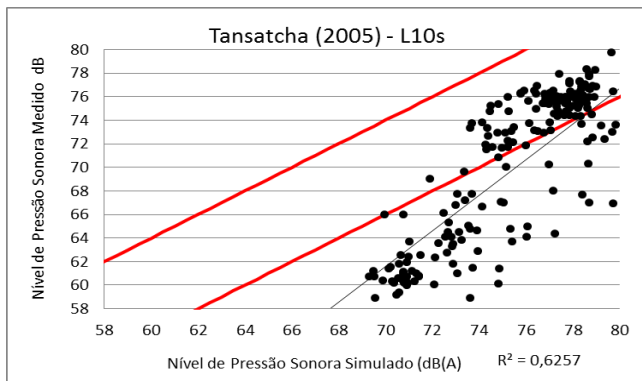


Figura 4 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo Tansatcha et al (2005)

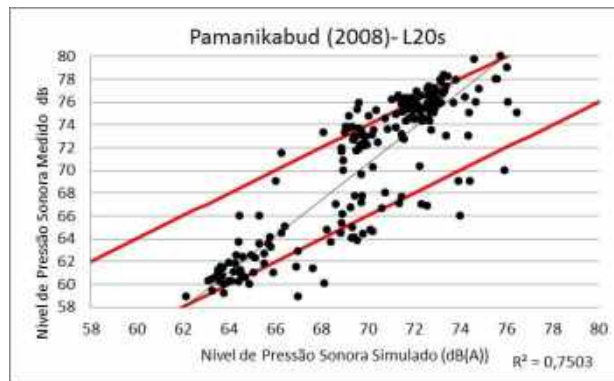


Figura 5 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo Pamanikabud (2008)

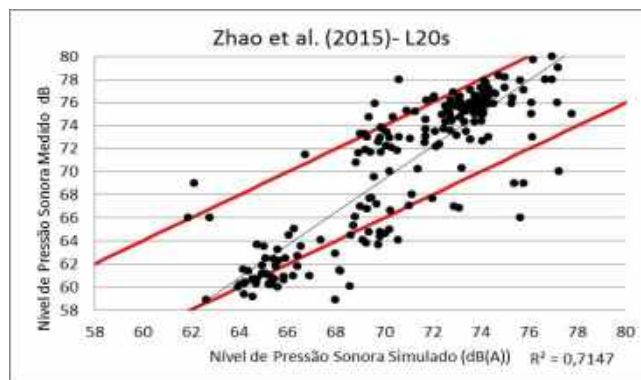


Figura 6 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo Zhao (2015)

A Figura 7 apresenta os resultados baseados no algoritmo proposto por FHWA (1998), Equação 5, baseado no ruído de passagem dos veículos em 5 s (L_{5s}). Estudou-se também a utilização do algoritmo da FHWA (1998) com a utilização do L_{10s} proposto por Tansatcha et al (2005), Figura 8, e L_{20s} proposto por Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008), Figura 9. No algoritmo original da FWHA (1998), L_{5s} , os resultados simulados foram superestimados, ou seja, ficaram em sua maioria acima do medido. Utilizando o L_{10s} proposto por Tansatcha et al (2005) os resultados simulados se colocaram dentro da margem de ± 2 dB mas ainda apresentado a tendência de superestimar os resultados simulados, agora apenas nos fluxos de tráfego menores. Ao se aplicar o L_{20s} de Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008), Figura 9, no algoritmo da FWHA (1998) observou-se uma tendência inversa, os resultados simulados foram menores que os reais medidos, sendo que essa tendência diminui com o aumento do volume de tráfego e velocidade (ângulo de inclinação da linha de tendência maior que 45°). Desta forma o algoritmo inicial da FHWA (1998) baseado no L_{5s} tem um desempenho melhor quando utilizado o L_{10s} proposto por Tansatcha et al (2005), sendo que o L_{20s} proposto por Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008) superestima dos resultados simulados. Os índices de correlação (R^2) dos algoritmos que utilizam o ruído de passagem apresentados nas Figuras 4 a 9 são similares, sendo os modelos L_{10s} de Tansatcha et al (2005) e o L_{5s} do FHWA (1998) os menores valores.

A Figura 10 apresenta os resultados baseados no algoritmo proposto por RLS 90 (1990), Equação 10, que apresentou resultados subestimados em sua maioria, principalmente com nas maiores velocidades e volume de tráfego. A Figura 11 apresenta os resultados baseados no algoritmo de Cochi, Farina e Lopes (1991) utilizado pelo *Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR*, Equação 11, sendo que este apresentou o maior número de resultados dentro do limite proposto, bem como o melhor índice de correlação, sendo o único que obteve valor acima de 0,8.

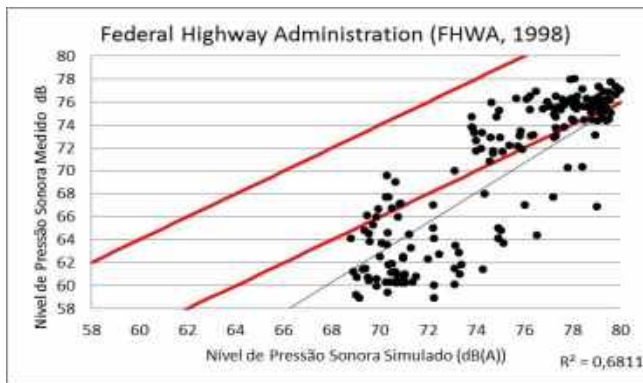


Figura 7 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo FWHA (1998)

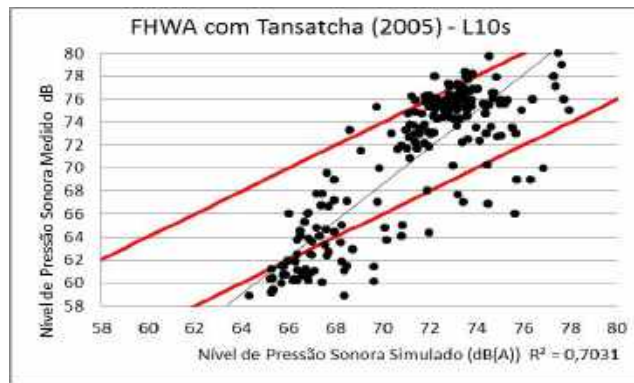


Figura 8 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo FWHA (1998) utilizando o L_{10s} de Tansatcha et al (2005)

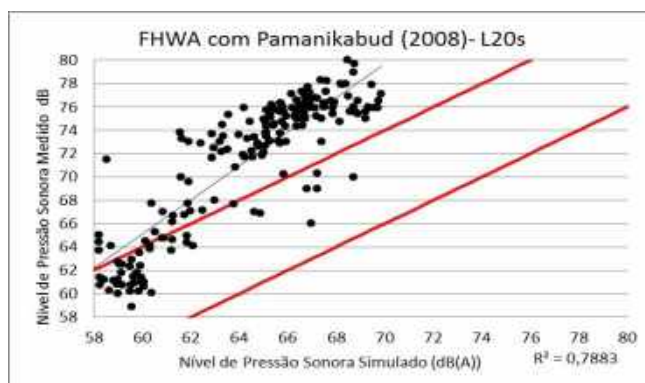


Figura 9 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo FWHA (1998) utilizando o L_{20s} de Pamanikabud (2008)

Dos algoritmos utilizados os propostos por Pamanikabud, Tansatcha e Brown (2008), Zhao et al. (2015) e FHWA (1988) com o L_{10s} proposto por Tansatcha et al (2005) foram o que apresentaram menor número de valores simulados fora da margem de diferença de ± 2 dB, cerca de 24% com uma correlação de 0,70, 0,79 e 0,70 respectivamente, mas todos com um ângulo de inclinação da linha de tendência superior a 45°. Esse comportamento de simulação se deu em todos os algoritmos utilizados o que indica que os resultados simulados, quando o volume de tráfego e a velocidade são menores, são maiores que os medidos. Com o aumento desses parâmetros essa tendência se inverte. Essa característica dos algoritmos pode ser influenciada pela diferença da geração de ruído com a variação da velocidade. Segundo Heckl (1985) a partir da velocidade de aproximadamente 60 km/h o ruído gerado pelos pneus dos veículos leves predomina sobre o ruído gerado pelo conjunto motor/transmissão. Isso se dá devido a efeitos vibratórios e aerodinâmicos. O movimento circular dos pneus e os efeitos vibratórios causados pela deformação na banda de rodagem, causa a vibração de todo o sistema o que gera ruído (EISENBLAETTER, WALSH, KRYLOV, 2010). O ruído aerodinâmico é gerado pela passagem forçada de ar pelas cavidades de escoamento de água do pneu. A geração de ruído se dá na expulsão deste volume de ar em alta velocidade (CESBRON *et al*, 2009). Assim um algoritmo que represente bem as características do tráfego rodoviário de uma região, além da precisão em relação aos valores medidos, necessita também que mantenha uma coerência de resultados com a variação do volume de tráfego e velocidade dos veículos.

Uma das formas de se propor adaptações nos algoritmos seria simplesmente adicionar ou subtrair um fator do resultado obtido. Para isso é necessário que a linha de tendência dos resultados obtidos seja o mais próxima possível de 45°. Os algoritmos que melhor apresentam essa possibilidade são dos da FWHA (1998), Figuras 7 e 9, que foram adaptados e rerepresentados na Figura 12 (FWHA, 1998) com uma correção de -4,5 dB e na Figura 13 com uma correção de 6,5 dB, sendo que o primeiro apresenta cerca de 22,5% dos resultados fora da margem de ± 2 dB e o segundo 18,7%.

Brito e Toledo (2017) propuseram uma alteração nos coeficientes α e β , referentes à emissão de ruído de veículos leves e pesados respectivamente, de modo a melhorar a precisão dos dados simulados pela Equação 11 e apresentados na Figura 11. Propuseram os valores de 30,5 e 12 para os coeficientes α e β respectivamente baseados em um volume de dados de 50 medições realizadas e vias de tráfego com velocidades de 60 a 80 km/h. No presente estudo são consideradas 213 medições em vários locais do país de forma que são mais representativas como um todo, sendo que as velocidades das vias avaliadas varia entre 45 e 80 km/h. Os valores dos coeficientes α e β propostos são 28,2 e 10,3, apresentados na Figura 14. Em

relação aos resultados obtidos com os coeficientes originais (35,1 e 6), Figura 11 nota-se uma elevação de valores simulados dentro da margem de erro de ± 2 dB representadas pelas linhas vermelhas. Apenas 25 (11,7%) das 213 medições apresentaram diferenças superiores a ± 2 dB entre os valores simulados e medidos, mas ainda nota-se que a linha de tendência não possui o ângulo desejável de 45° indicando que o modelo não tem a mesma precisão independente do volume de tráfego e velocidade.

Desta forma, apesar do algoritmo representado pela Equação 11 necessitar de correções devido à velocidade, como feito nesse trabalho, é possível utilizar coeficientes α e β diferentes para certos grupos de velocidade, como por exemplo, maiores ou menores que 60 km/h devido a já citada diferença na forma de geração de energia sonora. Aplicando valores de α e β como especificados na Tabela 1 obtém-se os resultados da Figura 15, onde apenas 15 (7,0%) das 213 simulações, estão fora da margem de erro de ± 2 dB. Nessa nova proposta a linha de tendência está bem próxima dos desejáveis 45° melhorando a precisão do modelo independentemente do volume de tráfego e velocidade dos veículos.

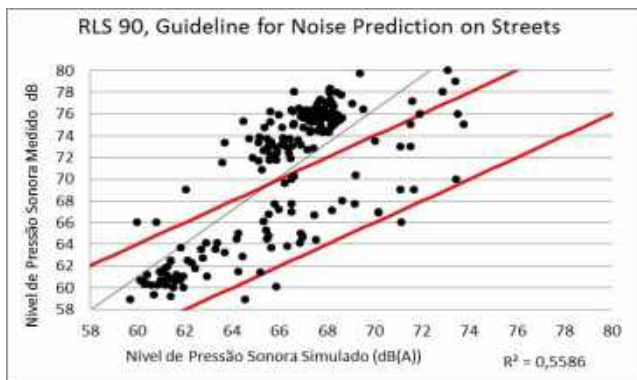


Figura 10 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo RLS (1990)

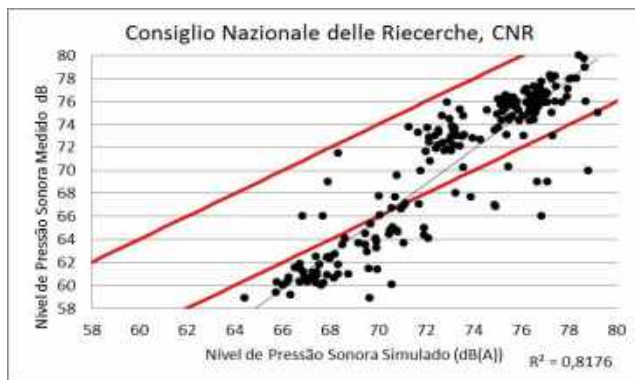


Figura 11 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo Cochi, Farina e Lopes (1991)

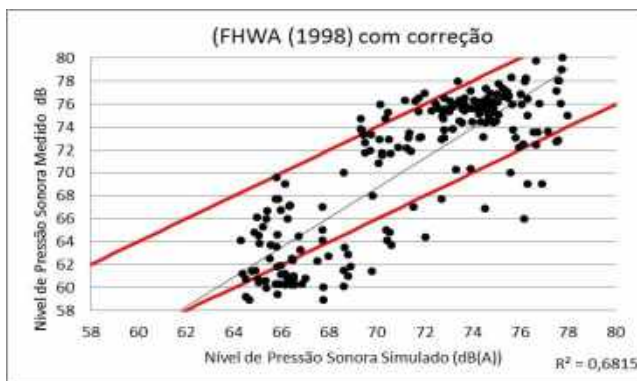


Figura 12 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo FHWA (1998) com uma correção de -4,5 dB

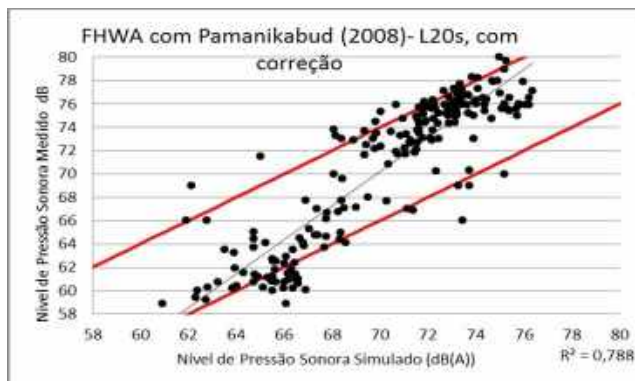


Figura 13 Resultados obtidos aplicando os dados selecionados no algoritmo FHWA (1998) utilizando o L_{20s} de Pamanikabud (2008) com um correção de 6,5 dB

Tabela 1 Coeficientes α e β propostos para velocidades superiores e inferiores a 60 km/h

| Velocidade | α | β |
|----------------|----------|---------|
| ≥ 60 km/h | 27,1 | 15,5 |
| < 60 km/h | 32,5 | 11,2 |

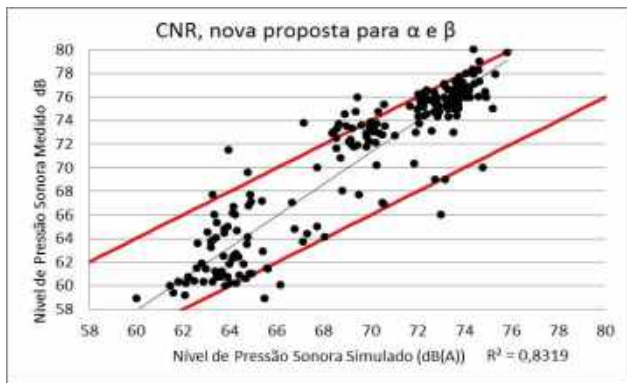


Figura 14 Algoritmo de Cochi, Farina e Lopes (1991) com nova proposta para valores de α e β

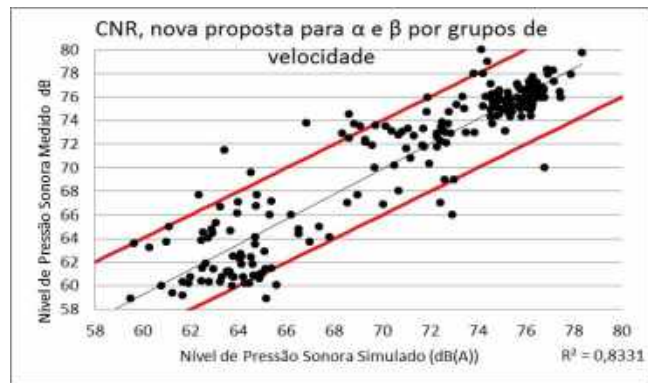


Figura 15 Algoritmo de Cochi, Farina e Lopes (1991) com nova proposta para valores de α e β por grupos de velocidade (maior ou menor que 60 km/h)

5. CONCLUSÕES

Os algoritmos desenvolvidos em outros países, principalmente os que utilizam regressão linear como base para cada categoria de veículos, não conseguem reproduzir com um grau de precisão desejável o atual padrão de emissão sonora no Brasil. Deve-se destacar também, que por serem livres também são antigos, e foram desenvolvidos em outra realidade de veículos, diferente da atual. A determinação do ruído de passagem (L_{10s} , L_{20s}) na condição brasileira poderia melhorar a precisão desses algoritmos.

Todos os algoritmos testados não apresentam uma linearidade nas simulações, variando a precisão com o aumento do volume de tráfego e/ou velocidade, o que inviabiliza a aplicação de um fator de correção, positivo ou negativo.

O único dos algoritmos que permitem tal ação é o desenvolvido por Cochi, Farina e Lopes (1991) utilizado pelo *Consiglio Nazionale delle Ricerche, CNR*, sendo que quando utilizado os coeficientes α e β por categoria de velocidade se obtém a melhor precisão (93%), com uma linha de tendência próxima a 45° , e com a maior correlação (R^2), 0,83.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10151**- Acústica. Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade. Rio de Janeiro, ABNT, 2000
- ALEIXO, P., CONSTANTINO, M.; CARVALHO, M. L. DE U.. Análise da Paisagem Sonora das Praças: Cívica e Tamandaré em Goiânia-GO. Brasil. In: XXV Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2014. Campinas, *Anais*, 238 – 24, 2014
- ALEXANDRE, A, BARDE J.. Road traffic noise. Applied Science Publisher. APUD Maia, M. A. **Contribuição ao mapeamento do ruído urbano da cidade de Porto Alegre (RS)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre. 1975
- BASNER, Mathias. Auditory and non-auditory effects of noise on health. *The Lancet*, v. 383, n. 9925, p. 1325-1332, 2014.
- BÉCARD, V.; CAMPODONIO, G.MATIAZZO, M., ISNARD, N.. Mapa de ruído de São Paulo: estudo comparativo das normas existentes de emissão de ruído rodoviário com os níveis de ruído reais medidos em campo. In XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2017. Brasília, *Anais*
- BRASILEIRO, T. C., DANTAS DE ARAÚJO, B. C.. Mapeamento sonoro do Bairro Castelo Branco, em João Pessoa/ PB. In: XIV Encontro Nacional Sobre o Conforto no Ambiente Construído 2017, Balneário Camboriu, *Anais...*, 2017.
- BRITO, L. A. P. F. de. Metodologia para Estimativa do Ruído de Tráfego: Aspectos Práticos e de Precisão. In: X Encontro Nacional Sobre o Conforto no Ambiente Construído 2009, Natal, *Anais...*, 2009.
- BRITO, L. A. P. F. DE, BARBOSA, A. S.. Incremento do Nível de Ruído no Meio Urbano Devido às Atividades Turísticas: Estudo de Caso na Cidade de Campos do Jordão. *Revista Tecno-Lógica*, 18(2), 84 - 89. 2014
- BRITO, L. A. P. F., TOLEDO, V. D.. Avaliação de Algoritmos Matemáticos na Previsão de Ruído de Tráfego. In: XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2017. Brasília, *Anais*.
- BRITO, L. A., O. F., CARVALHO JR, J. B., TOLEDO, V. D.. A eficiência de algoritmos matemáticos para avaliação do ruído urbano, *URBE. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v10(1), p. 22-35, 2018. DOI 10.1590/2175-3369.010.001.a003
- CALIXTO, A.. **O ruído gerado pelo tráfego de veículos em “rodovias e grandes avenidas” situadas dentro do perímetro urbano de Curitiba, analisado sob parâmetros acústicos objetivos e seu impacto ambiental**. Dissertação de Mestrado, Setor de Tecnologia, UFP, Curitiba, 2002
- CESBRON, J., ANFOSSO-LE, F., DUHAMEL, D., YIN, H. P. LE. HOUEDEC, D.. Experimental study of tyre/road contact forces in rolling conditions for noise prediction. *Journal of Sound and Vibration*, v. 320, p.125–144, 2009
- COCCHI A., FARINA A., LOPES G., Modelli matematici per la previsione del rumore stradale: verifica ed affinazione del modello CNR in base a rilievi sperimentali nella città di Bologna, 19° Convegno Nazionale AIA, 1991, Naples, *Anais...* 1991.
- COSTA, C.A.; GARAVELLI, S.L.; MELO, W.C.; SILVA, E. F. F.; CARVALHO JR, E.B; ARRUDA, F. S.; MAROJA, A.M.. Alteração no clima acústico devido á implantação da nova sede do Governo do Distrito Federal. In XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2017. Brasília, *Anais*.
- ESTÉVEZ, L.; GARCÍA, E.; CEPEDA, J.; BÚRDALO, G. BARIOS, M.; BARRIOS, M.. Acoustic Characterization of Pedestrian Areas, In: *Internoise*, 2013 Innsbruck, *Anais...* 2013

- EISENBLAETTER, J., WALSH S. J., KRYLOV, V.V.. Air-related mechanisms of noise generation by solid rubber tyres with cavities. **Applied Acoustics** v. 71, p. 854 – 860, 2010
- FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Traffic Noise Model, Technical Manual. Washington, FHWA. 1998
- GIUNTA, M. B., SOUZA, L. C. L.; VIVIANI, E.. Ruído Ambiental em Cidades de Médio Porte: Estudo dos Casos das Cidades de São Carlos e Bauru – SP. In: XXIV Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2014 Belém, **Anais...** 2014
- GUEDES, I. C. M, KOHLER, R., CARVALHO, R. M.. Estudo de Impacto do Ruído de Tráfego Veicular Aracaju (SE) – BRASIL. In: XXV Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2014, Campinas, **Anais ...** 26 – 33). 2014
- HECKL, M. Tyre Noise Generation. In: SEMINAR OF FRICTION AND CONTACT NOISE, Delft, Netherlands, 1985. **Proceedings...**Delft, Netherlands. Delft University of Technology, 1985
- HMSO - HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE, DEPARTMENT OF TRANSPORT. Calculation of Road Traffic Noise. London, HMSO. 1988
- IVANOVIC, L., JOSIFOVIC D., ILI, A., STOJANOVIC, B., RAKIC, B.. Noise as aspect of life quality at urban areas. In: 8th International Quality Conference, 2014, Kragujevac, **Anais...** 2014
- KAWAKITA, C. Y. . **Medição do ruído de tráfego na rodovia SP 270 e avaliação da satisfação quanto ao conforto acústico de seus moradores**. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2008
- LAM, H.K., TAM, M. L.. Reliability Analysis of Traffic noise estimates in Hong Kong. **Transportation Research**, 3(4), 238 – 248. 1998
- LAWTON, R. N.; FUJIWARA, D.. Living with aircraft noise: Airport proximity, aviation noise and subjective wellbeing in England. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 42, p. 104-118, 2016.
- ŁOWICKI, D., PIOTROWSKA, S.. Monetary valuation of road noise. Residential property prices as an indicator of the acoustic climate quality. **Ecological Indicators**, 52, 472 – 479. 2015
- MELO, R. A., PIMENTEL R. L., LACERDA, D. M. SILVA, W. M. Applicability of models to estimate traffic noise for urban roads **Journal of Environmental Health Science & Engineering**, 2015. DOI 10.1186/s40201-015-0240-9
- MARQUES, J. R.. Os danos causados ao meio ambiente por poluição sonora, eletromagnética, visual e luminosa: reparação, sanções penais e Administrativas. **Revista Jurídica do Ministério Público do Estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, v.14, n.25, p.217-296, jul./dez., 2015. ISSN 1809-8487.
- MELO, R. A., PIMENTEL, R. L. , LACERDA, D. M., SILVA, W. M.. Applicability of models to estimate traffic noise for urban roads. **Journal of Environmental Health Science & Engineering**. 2015. DOI 10.1186/s40201-015-0240-9
- MURPHY, E., *Environmental noise pollution: Noise mapping, public health, and policy.*: Elsevier, 2014
- NIEMEYER, M. L., CORTÊS, M.. (2012). Avaliação do Incômodo Sonoro da Linha Vermelha no Bairro de São Cristóvão, Rio de Janeiro. In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2012. Belém, **Anais...** 2012
- PAIS, A. P. T. D., ARAGÃO, F. V., SOUSA. L. MARINHO, L. H. N., SOARES, P. F.. Utilização de modelos matemáticos na análise do ruído de tráfego em uma travessia urbana. In III Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Urbana, 2012, Maringá, **Anais**
- PAMANIKABUD, P., TANSATCHA, M., BROWN, A. L.. Development of a highway noise prediction model using an L_{eq} 20 s measure of basic vehicular noise. **Journal of Sound and Vibration**, 316, 317 – 330. 2008
- PINTO, D. N.. **Mapeamento acústico como ferramenta para predição do ruído urbano na área de influência do estádio Arena das Dunas, Natal (RN)**. Dissertação de Mestrado. UFRN, 2013
- RLS, 1990. RICHTLINIEN FÜR DEN LÄRMSCHUTZ AN STRASSEN. BM FÜR VERKEHR, Bonn, 1990.
- SCHERER, M.J.; PIAGETI, G.; VANI, L.. O Ruído Urbano e a Desvalorização Imobiliária, In: XXII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2008, Belo Horizonte, **Anais ...** 2008
- SCHIMITT, N. I. M.. Avaliação do Ruído Ambiental em Porto Alegre RS, In: XXV Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2014 Campinas, **Anais...** 42 – 50. 2014
- SILVA, A. C. A. F.; OLIVEIRA JUNIOR, W. F.; OITICICA, M. L. G. R.. É preciso silêncio? Usos do solo e o ruído urbano. um estudo de caso do bairro da Levada na cidade de Maceió. In: XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, 2017. Brasília, **Anais**.
- SØRENSEN, M., ANDERSEN, Z. J., NORDSBORG, R. B., BECKER, T., TJØNNELAND, A., OVERVAD, K., NIELSEN, O. R.. Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Incident Diabetes: A Cohort Study. **Environmental Health Perspectives** 121(2), 217 – 222., 2013
- SZCZEPANSKA, A., SENETRA, A., WASILEWICZ-PSZCZOŁKOWSKA, M.. The effect of road traffic noise on the prices of residential property – A case study of the polish city of Olsztyn, **Transportation Research**, 36, 167–177. 2015
- TANSATCHA, M., PAMANIKABUD, P., BROWN, A.L., AFFUM, J.K.. Motorway noise modeling based on perpendicular propagation analysis of traffic noise. **Applied Acoustics**, 66, 1135 - 1150. 2005
- TANG, S. K TONG, K. K.. Estimating traffic noise for inclined roads with freely flowing traffic. **Applied Acoustics**, 65, 171 – 181. 2004
- WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. Night Noise Guidelines for Europe. Copenhagen, WHO Regional Office. 2009
- _____. Burden of disease from environmental noise: Quantification of healthy lifeyears lost in Europe. Denmark. WHO Regional Office. 2011
- ZHAO, J., DING, Z., HU, B., CHEN, Y., YANG, W. Assessment and improvement of a highway traffic noise prediction model with L_{eq} (20 s) as the basic vehicular noise. **Applied Acoustics**, 97, 78 - 83. 2015

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ e a Universidade de Taubaté pelo financiamento dessa pesquisa.