

Estudo acústico de tráfego rodoviário rodante sobre pavimentos em concreto asfáltico e com camada porosa de atrito na rodovia BR 158/RS

Alessandro Alves¹, Luciano Pivoto Specht², Fernanda Dresch³, José Antônio Santana Echeverria⁴

¹Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, alessandro1979@gmail.com

²Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, luspecht@ufsm.br

³Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Brasil, fernandadresch.eng@gmail.com

⁴Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT, jaecheverria@yahoo.com

Recebido:

20 de junho de 2017

Aceito para publicação:

23 de junho de 2018

Publicado:

31 de dezembro de 2018

Editor de área:

Jorge Barbosa Soares

Palavras-chaves:

Ruído de tráfego,
Interface pneu-pavimento,
Camada porosa de atrito.

Keywords:

Traffic noise,
Tire-pavement interface,
Porous layer of friction.

DOI: 10.14295/transportes.v26i4.1410

RESUMO

O ruído de tráfego resulta do acúmulo de emissões sonoras devido a passagem dos veículos, este é oriundo de várias fontes como o funcionamento do motor, sistema de escape e da interação pneu-pavimento. As duas primeiras fontes de ruído afetam principalmente em baixas velocidades, enquanto que em velocidades acima de 50 km/h o ruído da interação pneu-pavimento é predominante. Estudos demonstram que o ruído ambiental é um dos principais fatores que prejudicam a saúde, sendo o segundo maior causador de doenças, perdendo apenas para a poluição do ar. O objetivo deste estudo é verificar a eficiência da CPA (Camada Porosa de Atrito), em reduzir o ruído nas rodovias. Desta forma, buscou-se avaliar o comportamento acústico de pavimento com revestimento em CPA, executado na rodovia BR 158/RS, e sua comparação com um revestimento tradicional em CA (Concreto Asfáltico) na mesma rodovia. A metodologia utilizada neste estudo segue os requisitos da norma ISO 11819-1 usando o processo de medição de passagem em que um medidor de nível de pressão sonora é instalado ao lado da pista e mede-se o ruído máximo causado pela passagem de no mínimo 180 veículos e suas respectivas velocidades, o que resulta no SPBI (*Statistical Pass-by Index*). Também foi verificada a influência do ruído de tráfego através da sua avaliação na divisão de frequências de bandas de oitavas e ainda se analisou a influência da pista seca versus pista molhada. Observou-se uma redução no nível de pressão sonora de mais de 6 dB (A) no pavimento com CPA em comparação com o pavimento tradicional avaliado.

ABSTRACT

Traffic noise results from the accumulation of noise emissions due to the passage of vehicles, this comes from various sources such as engine operation, exhaust system and tire-pavement interaction. The first two noise sources affecting mainly at low speeds, while at speeds above 50 km / h the noise of the tire-pavement interaction is predominant. Studies have shown that environmental noise is one of the main factors that detract from health, being the second biggest cause of disease, second only to air pollution. The objective of this study is to verify the efficiency of the PFL (Porous Friction Layer) in reducing road noise. In this way, we sought to evaluate the acoustic behavior of pavement with PFC, executed in highway BR 158/RS, and its comparison with a traditional coating in AC (Asphalt Concrete) in the same highway. The methodology used in this study follows the requirements of ISO 11819-1 using the pass-through measurement process in which a sound pressure level meter is installed next to the runway and the maximum noise caused by passing at least 180 vehicles and their respective speeds, which results in the SPBI (Statistical Pass-by Index). It was also verified the influence of the traffic noise through its evaluation in the frequency division of octave bands and the influence of dry versus wet surface on noise generation was also analyzed. A SPL (Sound Pressure Level) reduction of more than 6 dB (A) was observed on the pavement with PFC compared to the traditional pavement evaluated.



1. INTRODUÇÃO

O modal rodoviário de transporte tem papel indiscutível e é insubstituível tanto na economia quanto no cotidiano das pessoas. No Brasil, onde aproximadamente 65% das cargas e 90% dos passageiros são transportados em rodovias, tais valores são ainda mais marcantes (CNT, 2016). Todavia, é inegável o grave efeito ambiental causado tanto pela implantação das vias quanto pela operação de veículos; destacam-se na operação a poluição do ar pela emissão de dióxido de carbono e o ruído causados pelos veículos.

Já em 1977, Shafer apresentava uma compilação de diversas pesquisas (Londres e Vancouver em 1969, Chicago em 1971, Joanesburgo, Paris e Munique em 1972) sobre os ruídos ambientais que mais afetam o público em geral, sendo que o tráfego de veículos foi o mais lembrado. Nos últimos anos, o Brasil tem experimentado um expressivo aumento nas taxas de motorização, passando de 122 habitantes/veículo na década de 1950 para 2,94 habitantes/veículo em 2011, o que acentuou ainda mais o problema (ANTP, 2012). A Federal Highway Administration (FHWA, 1995) complementa que o ruído, tanto em zonas urbanas quanto rurais, está intimamente associado com os transportes.

O conforto possui um caráter subjetivo e é definido pela sensação de bem-estar e influenciado por vários fatores, entre estes, pode-se salientar a acústica. O som é definido como uma forma de energia que é transmitida pela colisão de moléculas, umas contra as outras, sucessivamente (Gerges, 2000). Já o ruído é tido como um tipo de som, mas o som não é considerado necessariamente um ruído (Alves, 2013).

Sandberg e Ejsmont (2002) e Raitanen (2005) afirmam que na Europa, cada vez mais, tem-se buscado alternativas para reduzir o ruído causado pelo tráfego ou minimizar os seus efeitos. Para pesquisar sobre o tema e buscar alternativas à sua atenuação, diversas iniciativas de cooperação têm sido estabelecidas. Destacam-se os projetos SILVIA (*SILenda Via - Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise*), FEHRL (*Forum of European National Highway Research Laboratories*) e SILENCE. Não obstante, nos EUA, a FHWA tem empreendido esforços no mesmo sentido (SILVIA, 2008; FEHRL, 2008; SILENCE, 2008; FHWA, 2008). As formas de atenuação do ruído vão desde ações de planejamento de transportes, modificações na fonte geradora de ruído (alterações nos pneus e pavimentos) e medidas mitigadoras (barreiras sonoras, por exemplo).

Atualmente, o ruído rodoviário é um problema grave de qualidade ambiental, o qual surge essencialmente dos mecanismos de contato entre os pneus e a superfície do pavimento, especialmente em vias de trânsito rápido, as quais necessitam maiores cuidados. Destacam-se as áreas próximas a aglomerados urbanos, em função de danos que podem causar à saúde da população. Neste sentido, o objetivo do trabalho é caracterização sonora da corrente de tráfego sobre dois trechos experimentais contíguos, um com revestimento em CPA (Camada Porosa de Atrito) e outro convencional em CA (Concreto Asfáltico).

2. REFERENCIAL TEÓRICO

As perturbações geradas pela exposição dos seres humanos ao ruído ambiental desencadeiam efeitos na saúde como perturbações no sono, aborrecimentos e estresse e, além disso, com um grande período de exposição, pode-se aumentar o risco de doenças cardiovasculares e distúrbios psiquiátricos (Alves, 2013). Conforme a World Health Organization (WHO, 2011), uma em cada três pessoas tem experiências de irritação durante o dia e uma em cada cinco tem o sono perturbado à noite por causa do barulho de estradas, ferrovias e aeroportos. Isso aumenta o

risco de doenças cardiovasculares e causam uma pressão arterial elevada. Ainda, tendo em conta o limiar definido pela WHO, pode-se verificar, em estudo desenvolvido por Alfred *et al.* (2006), que o nível de pressão sonora de tráfego rodoviário, desde essa época, já ultrapassava em muito os valores definidos como limites para Europa.

A exposição dos seres humanos a altos níveis de pressão sonora acaba por ocasionar respostas involuntárias e inconscientes do organismo a esse estímulo. As principais alterações fisiológicas reversíveis são: dilatação das pupilas, hipertensão sanguínea, mudanças gastrintestinais, reações musculares e vasoconstrição das veias. Além das alterações fisiológicas existem as bioquímicas que são: mudanças na produção de cortisona, do hormônio tireoidiano, de adrenalina, na glicose sanguínea e na proteína do sangue. O ruído também provoca efeitos cardiovasculares, tal como o aumento da pressão sanguínea, causando hipertensão arterial (Fernandes, 2002).

2.1. Fontes de ruído de tráfego

O ruído de tráfego resulta da acumulação das emissões de ruído de todos os veículos, no entanto, cada veículo tem várias fontes de ruído, cuja soma corresponde ao seu ruído total, conforme pode-se visualizar na Figura 1.

As principais fontes de ruído resultam do funcionamento do motor, do sistema de exaustão e da interação pneu-pavimento. As primeiras influenciam o ruído principalmente a baixas velocidades, enquanto que para velocidades acima dos 50 km/h o ruído da interação pneu-pavimento é predominante (Hanson *et al.* 2005; Bendtsen *et al.*, 2006; Sans, 2006).

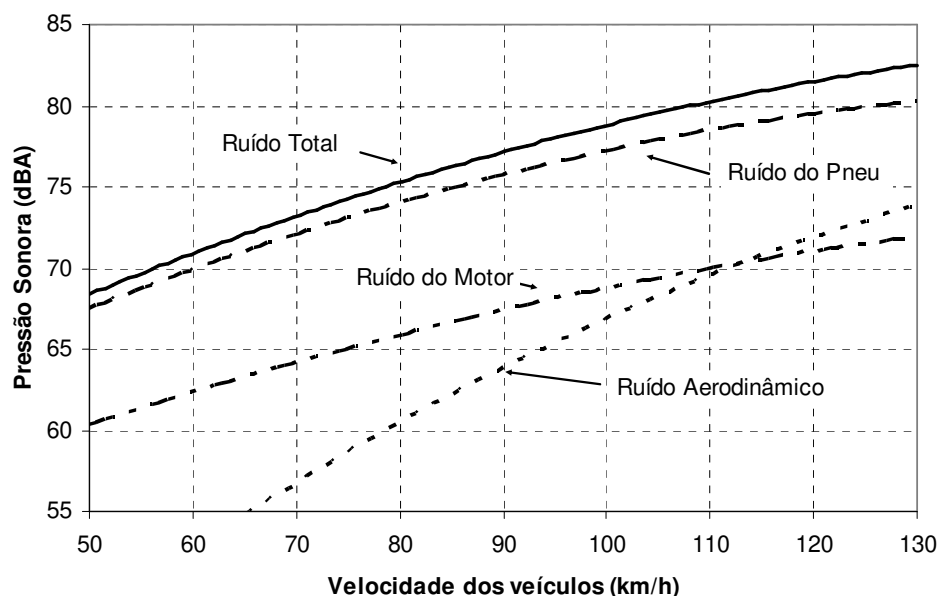


Figura 1. Influência dos diversos fatores no ruído. Fonte: Hanson *et al.* (2005)

2.2. Mecanismos de geração de ruído pneu-pavimento

O ruído de tráfego surge da acumulação das emissões de ruído de todos os veículos, veículos estes que individualmente possuem várias fontes de ruídos que, quando somadas, resultam em um ruído total. De acordo com Bernhard & Wayson (2005), Fehrl Report (2006), Rasmussen *et al.* (2007) e Specht *et al.* (2009) os mecanismos de geração e transmissão de ruído pneu-pavimento são bastante complexos.

A geração está ligada às vibrações mecânicas do pneumático (impacto, choque e adesão) e a mecanismos aerodinâmicos. A magnitude de cada fator depende da via (textura superficial, propriedades dos agregados utilizados e temperatura), do pneu (tipo, pressão de inflação) e do veículo (tipo, velocidade e condições de condução).

A transmissão pode ser direta (da fonte ao receptor) ou refletida em alguma barreira ou no próprio pavimento. Desta forma, fica caracterizado que muitos fatores podem influenciar o NPS (Nível de Pressão Sonora) total a ser medido. A Figura 2 demonstra que o NPS no receptor é a resultante do raio direto mais o raio refletido no pavimento.

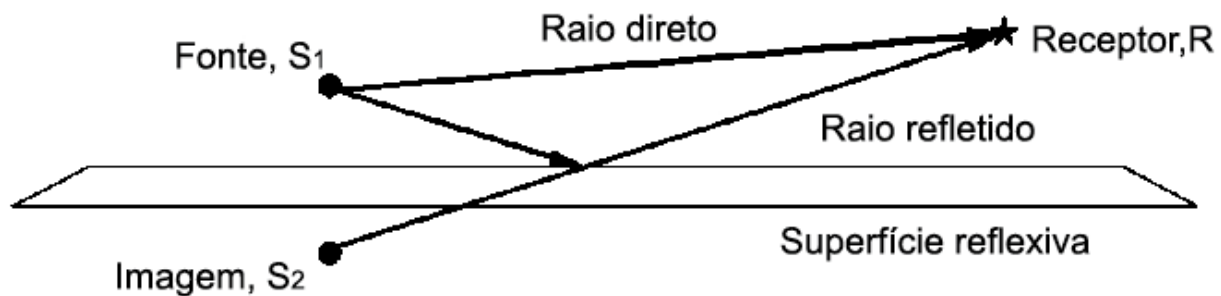


Figura 2. Propagação do ruído do pneu-pavimento. Fonte: Adaptado de Fehrl (2006)

2.3. Ações mitigatórias

Sabe-se que no Brasil poucas ações para o planejamento urbano ligadas às questões sonoras ou práticas mitigatórias são aplicadas. O mapeamento sonoro, as barreiras acústicas e pavimentos silenciosos não são amplamente difundidos e, como consequência, esses instrumentos de planejamento ficam restritos e aplicados basicamente no âmbito acadêmico científico.

Somado às fontes de ruído, o ambiente sonoro urbano é influenciado pelo seu entorno, pela quantidade, localização e distância entre edifícios, pelo tráfego veicular, pela arborização, pelos materiais utilizados nas fachadas e aberturas das edificações etc. Assim, conforme as formas físicas urbanas, os espectros sonoros podem sofrer difração, reflexão e absorção, o que pode contribuir para um maior desconforto em determinadas áreas (Guedes; Bertoli, 2005).

Esse conjunto de questões se torna mais evidente no caso brasileiro, quando o planejamento das cidades muitas vezes não leva em consideração as questões acústicas e não apresenta um efetivo programa de controle de ruídos. O Brasil possui alguns dispositivos legais e normativos, como a Lei Federal n. 10.257/2001, Resoluções Conama n. 001/1990, n. 002/1990 e n. 020/1994, ainda as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Na Europa, os métodos correntes para a limitação do ruído rodoviário incluem: a construção de barreiras acústicas, o controle do tráfego (com a limitação da velocidade), a alteração do traçado vertical e horizontal, a definição de zonas protegidas e o método, o qual trata-se neste trabalho da construção de pavimentos silenciosos (Camomilla *et al.*, 2004).

2.4 A utilização de pavimentos silenciosos

A redução da pressão sonora de um pavimento é considerada um dos parâmetros que influenciam no ruído rodoviário gerado pelo contato pneu-pavimento (Li *et al.*, 2015). Estudos mostram que o coeficiente de absorção sonora nos revestimentos abertos ou porosos varia com o

espectro de frequência da onda sonora e é mais favorável na faixa de 800 a 1000 Hz, que é normalmente a faixa de frequências na qual o ruído pneu-pavimento acontece com maior intensidade, especialmente para veículos de passeio (Sandberg & Ejsmont, 2004).

Os revestimentos asfálticos porosos e semiporosos apresentam importantes propriedades acústicas que podem afetar a geração e propagação de ruído dos veículos (Fehrl, 2006). Estes revestimentos são capazes de reduzir o som oriundo do sistema motor/escapamento, bem como o som gerado pela interação pneu-pavimento.

Os pavimentos silenciosos surgem da necessidade de redução do ruído que resulta do contato entre o pneu e o pavimento, uma vez que o estado atual da técnica não permite uma redução significativa do ruído produzido pelo motor e pelo sistema de exaustão dos veículos com motores à combustão interna. Os veículos elétricos colocam isso em uma nova perspectiva, de valorização ainda maior ruído aerodinâmico de pneu-pavimento.

Neste sentido, tem-se optado pelas camadas de desgaste porosas, as quais permitem, simultaneamente, aumentar as condições de visibilidade e, conseqüentemente, de segurança na presença de precipitação e, ainda, reduzir o ruído de circulação do tráfego. Isto acontece, principalmente, em função de sua porosidade, resultante do alto volume de vazios em sua constituição (de 18 a 25%) derivado da granulometria indicada na sua dosagem. Desta forma, um pavimento revestido em CPA permite a atenuação da geração sonora, de parte do ruído produzido, em função de sua composição estrutural.

Relativamente às camadas tradicionais, as camadas porosas proporcionam uma redução do ruído geralmente compreendida entre 3 e 5 dB (A), por vezes até superiores em condições particulares (Baugham *et al.*, 2002). A eficácia das camadas silenciosas, especialmente as camadas drenantes, fica comprometida na presença de água, uma vez que esta pode aumentar significativamente os níveis de ruído (Descornet *et al.*, 2000).

A água na superfície dos pavimentos ocupa o espaço resultante da irregularidade da superfície nas camadas com misturas densas e abertas, principalmente o correspondente à macrotextura, assim como os poros dos pavimentos drenantes, tendo como consequência o aumento das vibrações e do bombeamento de ar. Assim, observou-se que a água pode conduzir a um aumento de ruído até 15 dB (A), sendo que nas camadas densas e porosas usadas em Portugal, verificou-se um aumento de 3 dB (A) (Freitas *et al.*, 2006), o que corresponde a um aumento de energia acústica de 50% (Tabela 1).

Tabela 1: Relações de variação de nível sonoro e perda de energia acústica.

Alteração Nível Sonoro	Percepção	Perda de Energia Acústica
0 dB (A)	Referência	0
-3 dB (A)	Mudanças perceptíveis	50%
-5 dB (A)	Mudanças mais perceptíveis	67%
-10 dB (A)	Metade do volume	90%
-20 dB (A)	1/4 volume	99%
-30 dB (A)	1/8 volume	99,9%

Fonte: Adaptado de USDOT/FHWA (1995)

A porosidade permite não só a drenagem da água do pavimento como também do ar que preenche as ranhuras do pneu. Deste modo, uma superfície porosa proporciona uma maior redução no nível de pressão sonora, que se traduz na redução da reflexão acústica do pavimento e na atenuação da propagação das ondas na superfície deste, sendo parte desta energia transformada em calor. A porosidade reduz o efeito de ressonância que ocorre entre a superfície do

pavimento e a parte da superfície do pneu que não está em contato. Para que estes efeitos sejam eficazes, a porosidade deve ser superior a 20% (Silvia, 2006).

3. MÉTODOS UTILIZADOS

A definição dos dois trechos em estudo, que estão localizados na rodovia BR-158/RS entre as cidades de Boa Vista das Missões e Palmeira das Missões, no estado do Rio Grande do Sul, partiu da tipologia da pavimentação asfáltica empregada nos segmentos e de seu entorno. Neste, buscou-se um setor que se apresentava livre de barreiras e edificações, facilitando a realização das medições de ruído produzidas pelos veículos e enquadrando-se nos requisitos da norma ISO 11819-1 com a pista seca e representando adequadamente o revestimento que se pretendia caracterizar.

Os segmentos foram analisados em sequência para garantir situações de tráfego e entorno próximas, podendo-se assim investigar a questão do ruído ambiental gerado pelo tráfego de veículos de passeio e pesados. O trecho em CPA analisado, com suas características apresentadas na Figura 3, apresenta as propriedades descritas na Tabela 2, assim como o pavimento de controle em CA.

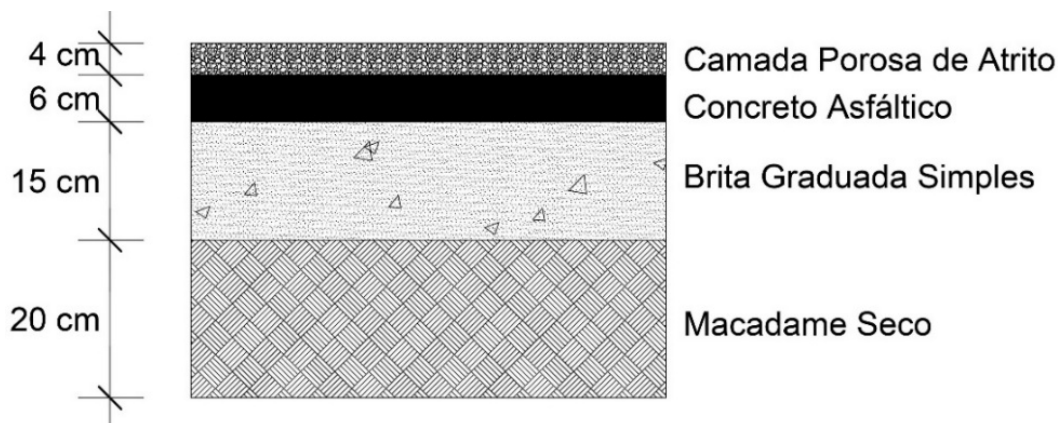


Figura 3. Esquema de composição do trecho em CPA do estudo

Tabela 2: Propriedades dos trechos em CPA e CA analisados.

Propriedades	Camada Porosa de Atrito Faixa V (DNER-ES 386/99)	Concreto Asfáltico Faixa C (DNIT 031/2006 -ES)
Teor de Ligante (%)	4,00	5,10
Volume de Vazios (%)	20,60	4,00
MR @ 25°C (MPa)	5248	4669
RT @ 25°C (MPa)	0,85	1,76

Fonte: Dresch (2016)

A Figura 4(a) apresenta a localização dos trechos avaliados, sendo que o trecho em CPA da rodovia BR-158/RS foi executado em dezembro de 2014. A Figura 4(b) permite visualizar, ainda, a melhor drenabilidade do CPA em relação ao CA, no limite entre os trechos, onde a lâmina d'água não permanece na superfície da camada porosa, mesmo quando em chuva torrencial, como na situação da foto.

Desta forma, possibilitou-se a análise e comparação do desempenho acústico da pavimentação asfáltica tradicional em CA com o trecho em CPA, através da medição do Nível de Pressão Sonora (NPS).

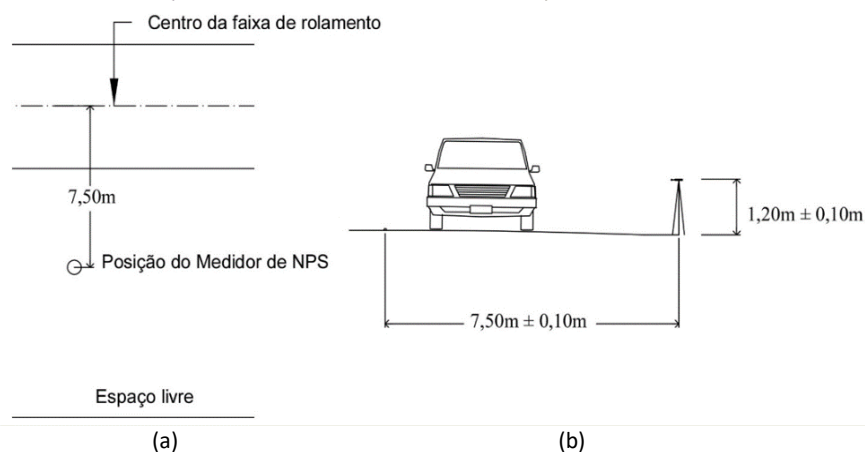


Figura 5. (a) Vista superior do posicionamento do equipamento de medida na rodovia (b) Vista frontal detalhando a altura do MNPS em relação ao pavimento.

Tabela 3: Velocidade de referência e peso dos fatores (Wx)

Categoria do veículo		Velocidade da rodovia					
		Baixa		Média		Alta	
Nome	Número	Velocidade de referência	Wx	Velocidade de referência	Wx	Velocidade de referência	Wx
Carros	1	50km/h	0,90	80km/h	0,80	110km/h	0,70
Pesados de dois eixos	2a	50km/h	0,08	70km/h	0,10	95km/h	0,08
Pesado de mais de dois eixos	2b	50km/h	0,03	70km/h	0,10	95km/h	0,23

Então aplica-se na Equação 1 que fornece o SPBI:

$$SPBI = 10\lg[W_1 \times 10^{L1/10} + W_{2a} (V_1 / V_{2a}) \times 10^{L2a/10} + W_{2b} (V_1 / V_{2b}) \times 10^{L2b/10}] \tag{1}$$

em que *SPBI*: Índice estatístico de passagem (*Statistical Pass-by Index*), para uma média entre veículos leves e pesados;

L1, L2a, L2b: Valores de nível pressão sonora para as categorias respectivas em dB(A);

W1, W2a, W2b: Fatores que presumem as proporções dos veículos respectivos, de acordo com a Tabela 3;

V1, V2a, V2b: Velocidades de referência dos veículos, de acordo com a Tabela 3.

O SPBI isola os aspectos ambientais e do tráfego (velocidade e tipologia de veículo), tendo como variável de estudo apenas o revestimento empregado. Considera-se esta medida de NPS bastante adequada, pois é, efetivamente, o que chega ao ouvido humano (considerando-se além do ruído de fundo todas as outras fontes oriundas do veículo e do ambiente avaliado).

Para se investigar os efeitos da água na pista em relação à geração de ruído, a pista foi molhada artificialmente com caminhão pipa e também foi medido o NPS utilizando-se o veículo de referência Chevrolet Cruze Sport 2016, o qual possui massa de 1436 kg e é equipado com pneus da marca Goodyear Efficient Grip Performance 225/50R17 94V, com a calibragem de 32 psi de pressão, valor este indicado pelo fabricante.

Para realização das medições do NPS foram utilizados os seguintes equipamentos: Medidor de nível de pressão Sonora 01dB - BLACK SOLO 01 número de série: 65856, calibrado pelo INMETRO em 14/03/2017, certificado de calibração nº RBC-1-9934-541 processo nº 17211; Calibrador de nível de pressão Sonora 01dB - CAL 21 número de série: 34634214, calibrado pelo INMETRO em 14/03/2017, certificado de calibração RBC-2-9934-673 processo nº 17211 e Microfone 01dB - MCE 212, número de série: 153606, calibrado por Prepolarized Free Field

Microphone em 14/03/2017. Configurou-se o medidor sonoro na curva de ponderação A e ainda se utilizou um tripé de apoio para garantir a distância mínima entre o MNPS e o pavimento.

A textura está presente na superfície do pavimento, sendo diretamente ligada à aderência no contato pneu-pavimento. Estudos anteriores já demonstraram relações estatisticamente significativas entre a textura dos pavimentos e índices de acidentes. Pulgurtha et al. (2011) utilizaram modelos lineares generalizados (MLG) para relacionar a macrotextura dos pavimentos com taxas de acidentes, acidentes com vítimas e danos materiais, a partir de dados dos Estados Unidos.

Também foi realizada a análise da aderência pneu-pavimento e, para isto, foi realizada avaliação da macrotextura (método Mancha de Areia) e microtextura (Pêndulo Britânico). O processo de mensuração da macrotextura, pelo método da altura de areia (ASTM E965-96), consiste em espalhar, com movimentos circulares de um dispositivo apropriado (espalhador de madeira com revestimento de borracha) na superfície do pavimento, um volume conhecido de areia ou microesferas de vidro ($25000\text{mm}^3 \pm 150\text{mm}^3$).

Já a microtextura está relacionada à própria superfície do agregado mineral, a qual pode ser áspera ou polida, cujos comprimentos de onda variam entre 0 a 0,5 mm e amplitude de 0 a 0,2 mm. Esta propriedade depende das características mineralógicas dos agregados e é de fundamental importância para romper o filme de água quando do contato pneu-pavimento. A maneira mais comum (em estradas) de se medir microtextura é por meio do ensaio de pêndulo britânico (ASTM D303-93).

O princípio de funcionamento do Pêndulo Britânico é a perda de energia de um pêndulo com base emborrachada ao deslizar sobre o pavimento. O ensaio determina a resistência à derrapagem na superfície; e o valor desta resistência devido ao atrito em uma escala experimental foi medido por este equipamento, sendo expresso em BPN (*British Pendulum Number*) ou, em português, VRD (Valor de Resistência à Derrapagem). A medição deste valor, representativo do local ensaiado, foi obtida realizando-se cinco lançamentos da sapata contra o pavimento, sendo a primeira medição descartada e as demais são usadas para calcular o valor médio do VRD.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

4.1. Resultados de microtextura e macrotextura

Nas medições para análise da microtextura obtiveram-se valores médios para o trecho com CPA, seco e molhado, de VRD = 86,6 e VRD = 57,6 respectivamente, e no trecho em CA tradicional, também seco e molhado respectivamente, de VRD = 90 e VRD = 60, verificando-se em todos os casos um VRD ≥ 55 , com classificação das superfícies apresentando características rugosas a muito rugosas, conforme recomendado pelo DNIT.

Conforme verificado nas referências, a maneira mais difundida de medição da macrotextura é através do ensaio de mancha (ou altura) de areia normalizado pela ASTM D965-96. Na Tabela 4 são apresentados os valores obtidos nas medições realizadas nos trechos em CPA e CA analisados. Com estes dados, pode-se verificar que pavimentos com revestimento em CPA resultaram em diâmetros médios menores e conseqüentemente maiores valores de HS.

Na figura 6 representa-se esquematicamente o princípio da determinação da macrotextura expressa pelo valor HS, através do ensaio de Mancha de Areia, tanto para o pavimento em CA quanto para CPA. Pode-se visualizar que o material despejado sobre a superfície apresenta um

comportamento para pavimentos em CA (onde a areia concentra-se em sua maior parte na superfície do pavimento) e outro para pavimentos em CPA (onde a areia infiltra nos poros do pavimento), em função de sua maior porosidade.

Verificou-se também que, em relação à microtextura, ambos os trechos se equivalem, estando dentro das recomendações do DNIT em relação à rugosidade das superfícies, reforçando que este fator não influencia no ruído total gerado ou não pode ser considerado isoladamente. Já em relação aos valores de macrotextura, nota-se uma grande amplitude de valores para os diferentes revestimentos, desde 0,44 mm do trecho de CA tradicional, com uma classificação média, até 1,79 mm para o trecho em CPA, classificado como muito grossa.

Tabela 4: Resumo dos valores obtidos no método de ensaio Mancha de Areia

	CPA		CA	
	Mancha 01	Mancha 02	Mancha 01	Mancha 02
diâmetro médio (mm)	147	141	286	279
HS (mm)	1,65	1,79	0,44	0,46

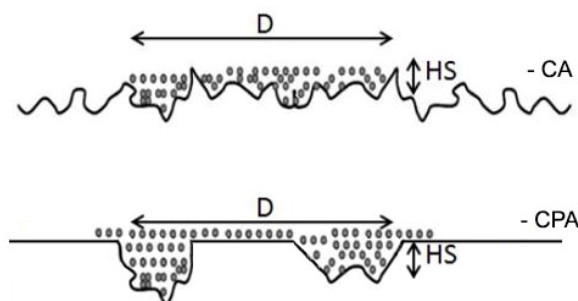


Figura 6. Esquema representativo do ensaio de Mancha de Areia nos pavimentos analisados

Cabe salientar que tais métodos servem para caracterizar a aderência do pavimento e, desta forma, foi mensurada a textura em duas escalas: microtextura (atrito) e macrotextura. Sendo que a microtextura depende da aspereza dos agregados usados no revestimento, enquanto que a macrotextura depende da granulometria e teor de ligante da mistura usada no revestimento do pavimento (Mattos et al., 2010). Na figura 7, apresenta-se uma ilustração com a diferença entre as escalas de textura.

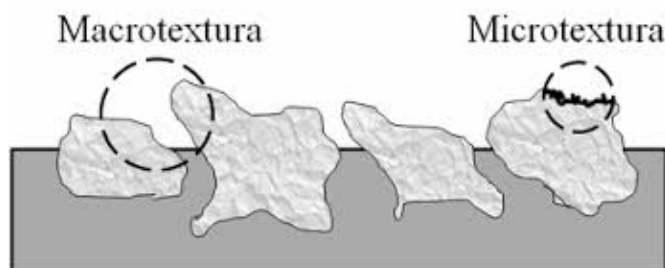


Figura 7. Representação da textura do pavimento. Fonte: Mattos (2009)

Segundo estudos de Saleh et al. (2010), as características das superfícies de pavimentos são bons indicadores do desempenho de pavimentos com relação a resistência à derrapagem e drenagem. Porém, ao se considerar a geração de ruído sabe-se que os ruídos da relação pneu/pavimento e o ruído ambiental são causados por um conjunto complexo de mecanismos entre o

pneu de rolamento e a superfície da estrada (FEHRL REPORT 2006/02), além das características do local onde está sendo realizado as medições.

Os mecanismos de geração de ruído são devidos a um conjunto de fenômenos estruturais que podem causar vibrações mecânicas do pneu (mecanismos de impacto e mecanismos de adesão) ou a fenômenos aerodinâmicos (os efeitos de buzina acústica, impedância acústica, impedância mecânica e ressonância do pneu) transmitidos pelo ar (SANDBERG & EJSMONT, 2004). Desta forma, é possível desprender que, para pavimentos com tipologias de macrotextura tão diferentes não é possível imaginar que os mecanismos citados tenham o mesmo peso em cada uma das superfícies avaliadas pelo método SPBI, o que poderá ser detectado, por exemplo, através do método CPX (*Close Proximity*), porém não sendo o enfoque deste trabalho.

4.2. Resultado das medições de NPS

Na obtenção dos dados e de posse das mais de 1000 medidas realizadas, em duas etapas de medições, além da velocidade, as variáveis número de eixos foram relacionadas com a variável pressão sonora e, assim, foi possível verificar que, de uma maneira geral, aumentando o número de eixos, aumenta-se o ruído, notadamente quando se passa de veículos leves (classe 1) para veículos comerciais (classe 2a e 2b), conforme apresentado na Figura 8.

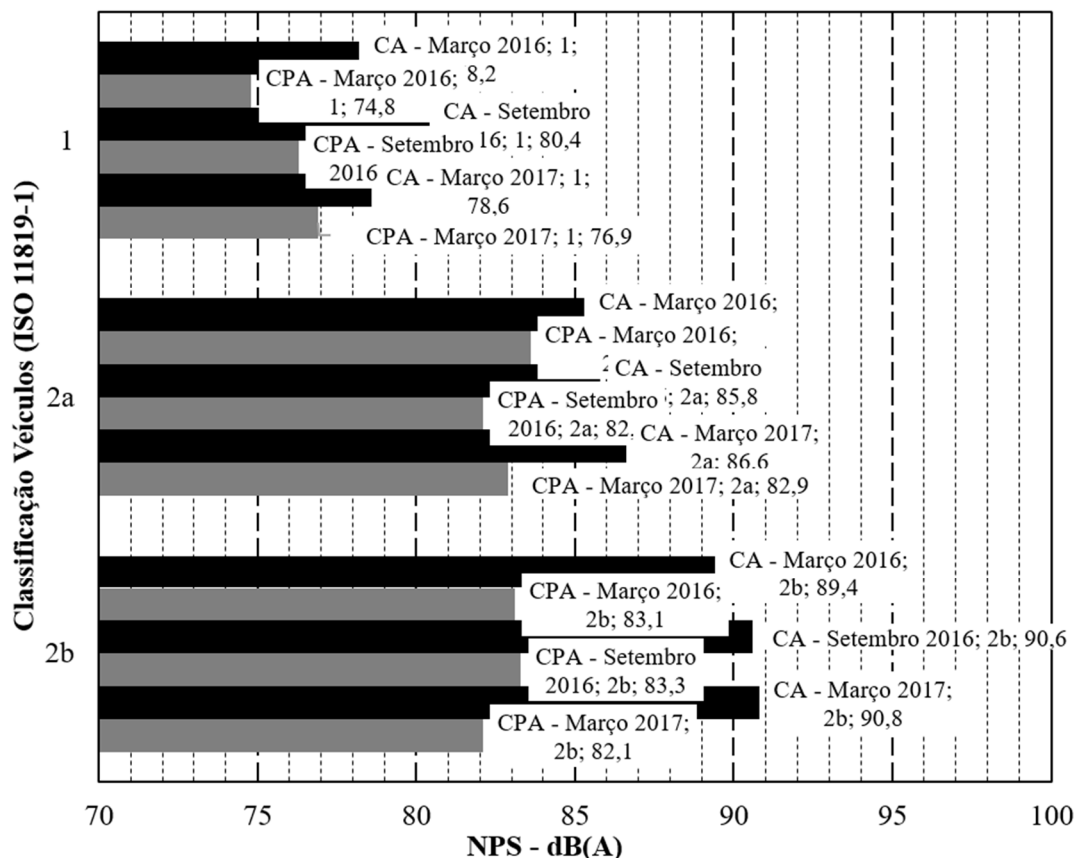


Figura 8. Gráfico relacionando o NPS dos pavimentos em CPA e CA conforme a classificação de veículos ISO 11819-1

Destaca-se, que nas medições e aquisições destes dados descartou-se veículos que apresentassem ruídos em função de defeitos na carroceria, engrenagens e/ou ruídos excessivos oriundos do motor. Esta filtragem foi feita quando se verificava um NPS excessivo, em função da aceleração do motor, por exemplo, e/ou por análise visual dos veículos. Também, para se atender

os requisitos da norma ISO 11819-1, as velocidades médias de todos os veículos estavam entre 50 e 80 km/h, garantindo, conforme Hanson et al. (2005), que o principal componente do NPS medido é devido a interação pneu-pavimento, e ainda, que as diferenças entre as velocidades foram compensadas por efeito estatístico proposto no método utilizado.

O tipo de revestimento causa modificações expressivas no ruído, conforme pode-se verificar na Figura 9. Quando se compara a média do CA, no 1º semestre de 2016, SPBI = 82,8 dB (A), no 2º semestre de 2016, SPBI \cong 84,0 dB (A) e no 1º semestre de 2017, SPBI \cong 82,4 dB, com a média do CPA, no 1º semestre, SPBI = 78,0 dB (A), no 2º semestre 2016, SPBI = 78,0 dB (A) e no 1º semestre 2017, SPBI = 77,7 dB (A), mantendo estatisticamente, em ambos os casos, o mesmo índice. A margem de erro de 1dB (A) corresponde às características do equipamento utilizado nas medições.

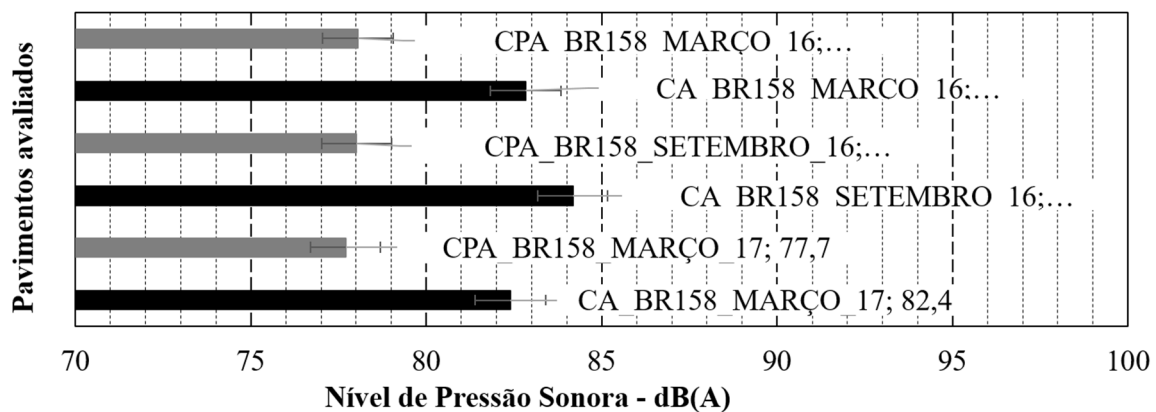


Figura 9. Gráfico comparando o SPBI dos pavimentos em CPA e CA da BR158, nas medições de março de 2016, setembro de 2016 e março de 2017

É verificada uma relação de proporcionalidade direta entre o tipo de pavimento, devido também as suas características superficiais e internas (porosidade), e o nível de pressão sonora obtida, com variação chegando à aproximadamente 6,0 dB(A) entre os trechos analisados, utilizando-se o SPBI. Sabe-se que o aumento de 3 dB(A) demonstra o dobro de energia sonora, alterações de -3 e -5 dB(A) no ruído representam 50 e 67% de perda na energia acústica, o que é bastante expressivo, conforme USDOT/FHA (1995).

Tal aumento encontrado nos pavimentos em CA deve-se ao efeito aerodinâmico, mas também à dinâmica do contato pneu-pavimento, onde verificou-se um menor HS (relacionado à macrotextura). Os valores de redução sonora apresentados pelo CPA, analisado através do SPBI, são compatíveis com os de pavimentos silenciosos, no contexto internacional (SILVIA, 2006).

Vale frisar, também, que neste período de sete meses não foi observado nem medido, no SPBI, o efeito da colmatação, apesar do tráfego de aproximadamente $1,23 \times 10^6$ repetições do eixo padrão.

Em outra análise, foi verificado o comportamento em relação às bandas de oitava (divisão do NPS em grupo de frequências) dos ruídos produzidos por veículos leves (veículos de passeio), onde os maiores NPS se concentram nos espectros de frequências de 500 e 1kHz, e veículos pesados (caminhão trucado de 3 eixos), onde os maiores NPS encontram-se nos espectros de frequências de 250 e 500 Hz, como pode ser observado na Figuras 10.

Neste sentido, confirmou-se que a CPA se enquadra na designação de revestimentos abertos, onde sua atenuação maior concentra-se no intervalo de frequências na faixa de 800 a 1000 Hz, sendo mais favorável para veículos de passeio do que para veículos pesados.

Esta avaliação tem como importância prática a verificação, em função da fonte sonora estar concentrada em diferentes faixas de frequências para os diferentes tipos de veículos, de como utilizar-se-á a CPA, de forma mais eficiente, considerando-se a redução de ruídos. Destaca-se, ainda, que quando das medições o ruído de fundo era de 49,9 dB (A).

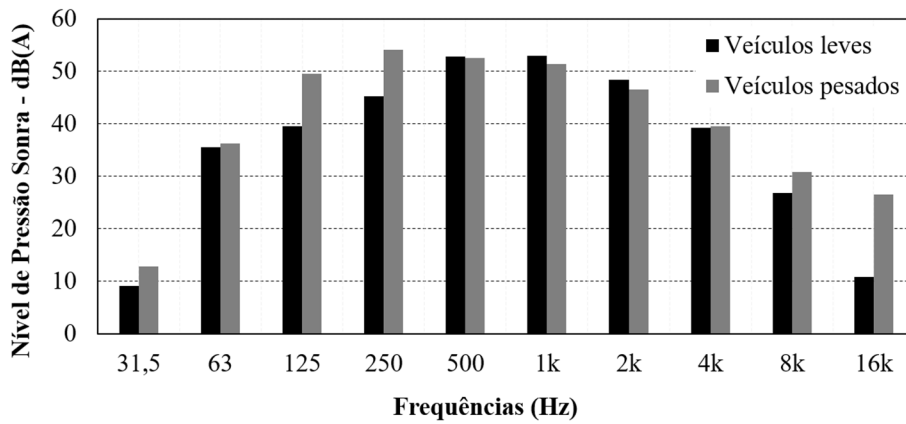


Figura 10. Bandas de oitava dos veículos leves e pesados em CPA na BR158

Verificou-se, com o veículo de passeio (descrito no item 3), a relação pista seca versus pista molhada no NPS produzido em diferentes velocidades para a camada em CPA e CA, conforme Figura 11. Fica clara a influência da presença de água no revestimento, como era de se esperar, na qual predomina o ruído causado pela movimentação desta água, especialmente, no contato pneu-pavimento, tanto para o CA quanto para o CPA.

Vale ressaltar que são pré-requisitos de norma ISO 11819-1, como condições meteorológicas, que a temperatura do ar ambiente deve situar-se entre 5 °C e 30 °C e a temperatura da superfície da estrada deve situar-se entre 5 °C e 50 °C. Ainda, a velocidade do vento na posição do microfone não deve exceder 5 m/s, deve-se avaliar o NPS de veículos isolados de outras fontes sonoras e com velocidades médias acima de 50 km/h, garantindo assim que o principal componente do NPS medido seja devido à interação pneu-pavimento.

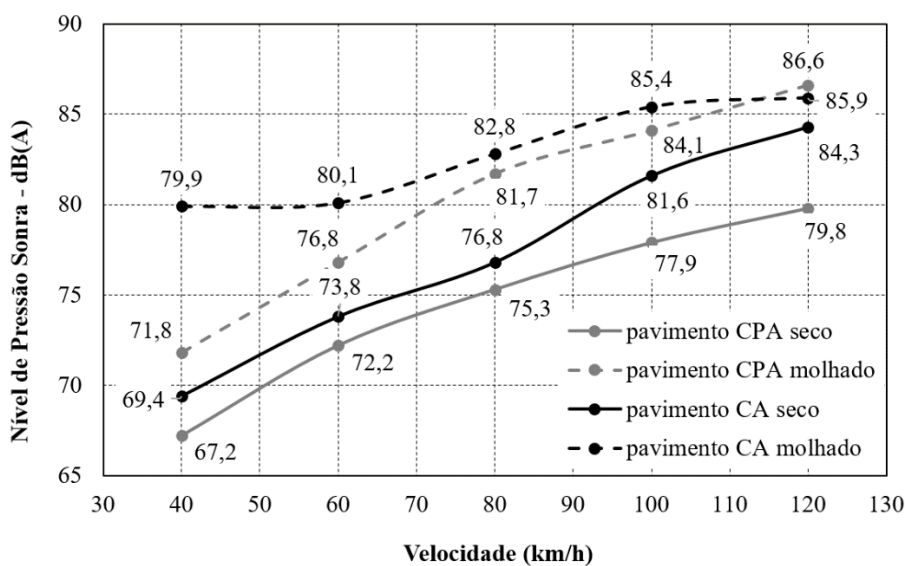


Figura 11. Gráfico representando a evolução do NPS em função da velocidade em pista seca e molhada nos trechos em CPA e CA

As curvas para o pavimento seco tendem a se afastar com aumento da velocidade, confirmando a importância da mistura aberta em altas velocidades, todavia, para pavimento molhado (entenda-se regiões muito chuvosas) o CPA pode ter sua eficácia questionada no quesito ruído, o que não desmereceria sua aplicação por outros aspectos.

Salienta-se ainda, que estas medidas foram realizadas com a pista molhada artificialmente e que durante a uma precipitação o ruído de fundo pode tomar outras proporções e influenciar os resultados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Cada vez mais o ruído causado pelo tráfego rodoviário tem se tornado um quesito de projeto de rodovias rurais e urbanas e tem sido alvo de pesquisas e preocupação da sociedade em geral. O artigo apresentou, a partir de medidas de NPS em 2 trechos diferentes da rodovia BR 158/RS, e em 2 períodos do ano, o cálculo do SPBI (*Statistical Pass-by Index*), através do qual foi possível verificar a importância do tipo de pavimento sobre o ruído ambiental. Esse índice é bastante adequado para caracterização do ruído, visto que a média direta dos valores medidos não pondera a velocidade e a composição de tráfego de cada via.

O CA foi o tipo de revestimento que apresentou os maiores valores de ruído, ampliando de 83,0 dB (A) para 84,0 dB (A) entre março e setembro de 2016, sendo que o CPA apresentou menor valor, 78,0dB (A), o qual se manteve constante no mesmo período de tempo. As diferenças de valores entre revestimentos chegam a 6,0 dB (A), o que representa perda na energia acústica acima de 50%. Reforça-se, também, que a redução da velocidade traz sensíveis reduções no ruído.

Destaca-se, ainda, um indicativo do efeito da água no pavimento e sua relação direta no aumento do NPS gerado pela interação pneu-pavimento. Verificou-se, também, que quanto maior a velocidade maior o ruído produzido. Da mesma forma, ao se aumentar a velocidade em pista molhada a diferença de NPS do pavimento em CPA em comparação com o pavimento em CA diminui.

Pode-se demonstrar que, os resultados apresentados indicam a importância de se considerar o tipo de revestimento no ruído ambiental, bem como podem auxiliar na tomada de decisão de futuros projetos de engenharia rodoviária onde preconize-se a redução de ruídos. Neste sentido, destaca-se ainda, a possibilidade de se propor novas dosagens e testá-las em laboratório, através do ensaio acústico com tubo de impedância.

REFERÊNCIAS

- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS) - NBR 10151. Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade – Procedimento. Rio de Janeiro. 2000.
- ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS) - NBR 10152. Níveis de ruído para conforto acústico. Rio de Janeiro. 1987.
- ALFRED, T., et al. Exposure-effect relations between aircraft and road traffic noise exposure at school and reading comprehension - The Ranch Project. *American Journal of Epidemiology*. 2006, Volume 163, pp. 27-37. DOI:10.1093/aje/kwj001
- ALVES, A. Desenvolvimento de uma ferramenta para análise do estudo de impacto de vizinhança na área de emissões sonoras. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação PPGEU-UFSM, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS.2013.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for measuring surface frictional properties using the British pendulum tester. D303-93. In: ASTM. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 5p. 2000.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for measuring pavement macrotexture depth using a volumetric technique. D965-96. In: ASTM. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, v 4.03, 3p. 2000.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Política nacional de transportes públicos. São Paulo: ANTP, 2012. 118p.

- BAUGHAM, C., CHINN, L., HARRIS, G., STAIT, R., PHILIPS, S. *Resurfacing a Motorway with Porous Asphalt: Effects on Rural Noise Exposure and Community Response*. Prepared for Traffic Safety and Environment Division (TSE), Highways Agency. Disponível em: <<https://trl.co.uk/sites/default/files/TRL536.pdf>>. 2002.
- BENDTSEN H., RAABERG J. "French Experiences on Noise Reducing Thin Layers". Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/843609>>. Denmark. 2006.
- BERNHARD, R.; WAYSON, R. L. An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement. Disponível em: <http://www.asphaltroads.org/assets/_control/content/files/anintroductiontotire-pavementnoiseofasphaltpavement.pdf>. Acesso em: dezembro de 2018. 27p.
- BRASIL. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n. 001, de 08 de março de 1990. Disponível em: <http://www.sua.pe.gov.br/images/publicacoes/resolucao/Resolu%C3%83%C2%A7%C3%83%C2%A3o_CO-NAMA_001_1990.pdf>. Acesso em: dezembro de 2018.
- BRASIL. Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) n. 002, de 08 de março de 1990. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=99>>. Acesso em: dezembro de 2018.
- BRASIL. Elaboração de Projetos Básico e Executivo de Engenharia para Restauração de Rodovia do Tipo CREMA – 2ª ETAPA, no Estado do Rio Grande do Sul. 2012. Disponível em: <http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/basicocrema242vol_1tomo_6.pdf>. Acesso em: dezembro de 2018. 451p.
- CAMOMILLA, G., LUMINARI, M. Silent Road for Urban and Extra-Urban Use: the Innovative resilient and resonant pavements, proceedings of the 5th symposium on pavement surface characteristics roads and airports, CD-Rom, World Road Association, Toronto, Canada. 2004.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2018 - Relatório Gerencial. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relatorio-gerencial>>. Acesso em: 18 de dezembro de 2018. 408p.
- DESCORNET, G., FAURE, B., HAMET, J., KESTEMONT, X., LUMINARI, M., QUARESMA, L., SANDULLI D. Traffic Noise and Road Surfaces: State of the Art, Report for SIRUUS project, Belgian Road Research Centre, Brussels. 2000.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Manual de estudos de tráfego. Publicação IPR723. Rio de Janeiro, 2006. 384p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. FHWA-PD-96-046 - DOT-VNTSC-FHWA-96-5. Measurement of highway-related noise. Washington, 1996. 213p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Highway traffic noise analysis and abatement policy and guidance. Washington, 1995. 95p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Highway traffic noise in the United States – Problem and response. Washington, 2006. 24p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Keeping the noise down - Highway traffic noise barriers. Washington, 2001. 24p.
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Sitio da Web, consultado em 18 de dezembro de 2018. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/>>.
- FEHRL - Forum of European National Highway Research Laboratories. 2008. Disponível em: <http://www.brcc.be/en/item/e244_01>. Acesso em: dezembro de 2018.
- FERNANDES, J. C. O ruído ambiental: Seus efeitos e seu controle. Bauru: Faculdade de Engenharia Mecânica da UNESP. 2002.
- FEHRL REPORT. Guidance manual for the implementation of low-noise road surfaces. Transportation Research Laboratory. Various authors. Bruxelas, Bélgica, 2006. 332p.
- FREITAS E., PEREIRA P., PICADO-SANTOS L., SANTOS A. A influência da água no ruído produzido pelo tráfego rodoviário. Universidade do Minho, Portugal. 2006. Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/55606655.pdf>>. Acesso em: dezembro de 2018.
- GERGES, S. N.Y. Ruído: Fundamentos e Controle. 2. ed. Florianópolis: UFSC, NR Editora, 2000. 600 e 676p.
- GUEDES, C. M.; BERTOLI, S. R. Forma urbana: um indicativo de sua influência no ambiente sonoro no bairro Jardins em Araçaju (SE). Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais. Maceió. 2005. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/encac/files/2005/EN-CAC05_2260_2261.pdf>. 2260 e 2261p.
- HANSON, D. I., DONAVON, P., JAMES, R. Tire/pavement noise characteristics for HMA pavements. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 74. 2005. 38p.
- HANSON, D. I.; JAMES, S. J.; NESMITH, C. Tire/pavement noise study. Auburn: NCAT - National Center for Asphalt Technology. Report n. 04-02, 2004. 44p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11819: Acoustics – measurement of the influence of road surface on traffic noise. Part 1. Genebra, 1997a. 31p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11819: Acoustics – measurement of the influence of road surface on traffic noise. Part 2. Genebra, 1997b. 31p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 13472: Acoustics - measurement of sound absorption properties of road surfaces in situ. Part 1: Extended surface method. Genebra, 2002. 27p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11819-1: Acoustics - Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise - Part 1: Statistical Pass-By method. Genebra. 1997.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 362 (E): Acoustics – measurement of noise emitted by accelerating road vehicles – engineering method. Genebra, 1998a. 18p.

- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3740: Acoustics - Determination of sound power levels of noise sources -- Guidelines for the use of basic standards. Genebra, 2000. 25p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO/DIS 13325: Tyres-coast-by-method for measurement of tyre/road sound emission. Genebra, 2001. 27p.
- LI, M. et al. Sound absorption measurement of road surface with in situ technology. *Applied Acoustics* 88, p. 12-21, 2015. DOI: 10.1016/j.apacoust.2014.07.009.
- MATTOS, J. R. G. Avaliação da aderência pneu-pavimento e tendências de desempenho para a rodovia BR -290/RS. 2009. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- MATTOS, J.R.G.; SPECHT, L.P.; NUQN\EZ, W.P. Avaliação das condições de aderência pneu-pavimento na Rodovia BR-290/RS. 4º Congresso de Infraestrutura de Transportes (CONINFRA), 2010.
- PULUGURTHA, S. S.; PATEL, K.; KUSAM, P. R. Pavement macrotexture thresholds to enhance safety: a case study using I-40 data in Durham County, North Carolina. *Anais do Transportation Research Board (TRB)*, Washington, D. C., 2011.
- RAITANEN, N. Measuring of noise and wearing of quiet surfaces. 2005. 96f. Tese (Doutorado) – Universidade de Tecnologia de Helsinque. Helsinque, 2005.
- RASMUSSEN, R.O.; BERNHARD, R.J.; SANDBERG, U.; MUN, E.P. The little book of quieter pavements. FHWA. 2007.
- SANDBERG, U. Tyre/road noise – myths and realities. International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. *Anais. The Hauge*. 2001. p. 01-22.
- SANDBERG, U.; EJSOMT, J. Tyre/road noise reference book. Kisa. 2002. 640p.
- SANDBERG, U.; EJSOMT J. Tyre/road Noise Reference Book. Informex Ejsmont & Sandberg Handelsbolag, Harg, Kisa, Sweden, 2004.
- SANS. Evaluación del Ruido de Rodadura en Carreteras. UCLM, Ciudad Real. 2006.
- SCHAFFER, R. M. The tuning of the world. New York: Knopf, 1977, 382p.
- SILENCE. Disponível em: <<http://www.silence-ip.org/site/>>. Acesso em: maio de 2017.
- SILVIA - SILenda Via - Sustainable Road Surfaces for Traf<ic Noise. Disponível em: <<https://trimis.ec.europa.eu/project/sustainable-road-surfaces-traffic-noise-control>>. Acesso em: dezembro de 2018.
- SILVIA. *Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces*. Brussels. Belgium. 2006. Disponível em: <[http://doutoramento.schiu.com/referencias/outras/Sustainable%20road%20surfaces%20for%20traffic%20noise%20\(SILVIA\).pdf](http://doutoramento.schiu.com/referencias/outras/Sustainable%20road%20surfaces%20for%20traffic%20noise%20(SILVIA).pdf)>. Acesso em: dezembro de 2018. 332p.
- SPECHT, L. P., CALLAI, S. C., KHATCHATOURIAN, O. A., KOHLER, R. *Avaliação do ruído através do SPBI (Statistical Pass-By Index) em diferentes pavimentos*. *Revista Escola de Minas*. p. 439-445. 2009. Disponível em: <DOI: 10.1590/S0370-44672009000400005>. Acesso em: 19 de dezembro 2018.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Novas Evidências dos Efeitos na Saúde Relacionadas com o Ruído de Tráfego na Europa*. 2011. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/themes/human/noise>>. Acesso em: 19 de dezembro 2018.