

ANÁLISE COMPARATIVA DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO ENTRE PAVIMENTO RÍGIDO E FLEXÍVEL ATRAVÉS DO TRAILER-CPX

Ramon Mendes Knabben

Glicério Trichês

Erasmio F. Vergara

Samir N. Y. Gerges

João Victor Staub de Melo

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

RESUMO

O ruído de tráfego constitui um dos problemas ambientais mais relevantes nos grandes centros urbanos. A sua exposição em elevados níveis afeta os seres humanos, os animais e inclusive às plantas. Diversas doenças graves têm seu desenvolvimento associado à exposição dos seres humanos aos níveis altos de pressão sonora, tais como hipertensão sanguínea, mudanças gastrointestinais, alterações na glicose sanguínea e aumento da frequência cardíaca, entre outras. A geração e propagação do ruído veicular são regidas por vários e diferentes mecanismos, podendo ser produzido, principalmente, pela vibração do motor, para velocidades abaixo de 40 km/h, e pelo contato pneu-pavimento para velocidades do veículo acima de 40 km/h. Entretanto, no futuro com a substituição dos carros comuns pelos carros elétricos o ruído veicular será gerado principalmente pela interação pneu-pavimento para qualquer velocidade. Este artigo apresenta um comparativo de medições do ruído pneu-pavimento entre pavimento rígido e flexível no estado de Santa Catarina. Foram realizadas medições com o Trailer-CPX em dois pavimentos de concreto com três texturas diferentes e em três misturas asfálticas com 3 texturas diferentes. O trailer é do modelo Trailer-CPX (*Close Proximity Method*), nome que se refere ao método normalizado de medição da interação pneu-pavimento. O Trailer-CPX foi construído e qualificado no Brasil na Universidade Federal de Santa Catarina de acordo com a norma ISO 11819-2 (2010) e todos os resultados das medições realizadas para a sua certificação foram atendidos. Os resultados dos ensaios com o Trailer mostraram que o pavimento rígido apresenta um nível de pressão sonora maior se comparado com o pavimento flexível.

ABSTRACT

Traffic noise is the one of most important environmental problems in large urban centers. Its exposure at high levels affects humans, animals and even plants. Several serious diseases have their development associated with exposure of humans to high levels of sound pressure, such as hypertension, gastrointestinal changes, changes in blood glucose and increased heart rate, among others. The generation and propagation of vehicular noise is governed by several different mechanisms. It can be produced mainly by the vibration of the engine, for speeds below 40 km/h, and by the tire-road interaction for vehicle speeds above 40 km/h. However, in the future with the replacement of ordinary cars by electric cars the vehicular noise will be generated mainly by the tire-road interaction for any speed. This paper presents a comparison of tire-road noise measurements between rigid concrete and flexible pavement in the state of Santa Catarina. Measurements were made with Trailer-CPX on two concrete pavement with three different textures and on three asphalt mixtures with 3 different textures. The trailer is the Trailer-CPX (*Close Proximity Method*) model, which refers to the standard method of measuring tire-road interaction. The Trailer-CPX was built and qualified in Brazil at the Federal University of Santa Catarina in accordance with ISO 11819-2. In addition, all the results of the measurements made for your certification has been met. The results of the tests with the Trailer showed that the rigid pavement presents a greater sound pressure level when compared to the flexible floor.

1. INTRODUÇÃO

O ruído do tráfego é uma preocupação em diversos países desenvolvidos pois gera grande impacto aos seres humanos e ao meio ambiente (Sygna *et al.*, 2014).

São diversas as doenças que afetam os seres humanos relacionadas com o ruído do tráfego, entre elas estão: estresse, alteração no padrão do sono, insônia, perdas de habilidade mental e motora, perda de memória, dores de cabeça, náuseas, perdas auditivas temporárias e definitivas, zumbido no ouvido e distúrbios nos sistemas circulatório, respiratório e imunológico (Who, 2011)

A poluição sonora é um dos problemas que mais afeta a saúde da população humana, só ficando atrás da poluição do ar e da água. Verificou-se, em um estudo realizado em Copenhague, que em áreas com maior nível de ruído havia maior porcentagem de consultas médicas, internações e uso de medicamentos (Gerges, 2000).

Em um congresso realizado na Suécia em 1989, o ruído passou a ser monitorado pela Organização Mundial de Saúde (OMS), em que políticas preventivas para do ruído deveriam ser tomadas em escala mundial (Astrana, 2006).

Com isso algumas soluções vêm sendo estudadas e adotadas durante as últimas décadas com o objetivo de reduzir o ruído provocado pelo tráfego, principalmente nas áreas de maior população. Tais soluções como a construção de revestimentos de pavimento de baixo ruído, a instalação de barreiras acústicas, o controle de velocidade e a mudança na geometria das vias.

O método de medição do ruído pneu-pavimento mais utilizado nos países desenvolvidos é o do Trailer-CPX (Close Proximity Method). Ele avalia com precisão a influência do ruído pneu-pavimento com a utilização de quatro microfones instalados próximos aos pneus de referência do trailer (Licitra *et al.*, 2014).

São dois os principais mecanismos de geração do ruído pneu-pavimento. O primeiro é chamado de ruído mecânico e está relacionado com a textura do revestimento, sendo o mais comum, o ruído mecânico de impactos e choques. O segundo é chamado de geração de ruído aerodinâmico e está diretamente relacionado com a porosidade do revestimento, e tem como principal gerador de ruído desse grupo, o mecanismo aerodinâmico de bombeamento de ar.

Neste trabalho foram analisados através do Trailer-CPX os ruídos de geração mecânica, pois os revestimentos dos pavimentos não apresentam alta porosidade.

As misturas asfálticas de baixo ruído de geração mecânica apresentam uma textura da superfície de rolamento negativa. Textura negativa é aquela que a superfície do pavimento é plana em sua grande parte, proporcionando que as vibrações no pneu sejam reduzidas (Rasmussen *et al.*, 2007). No entanto, com a textura muito lisa, em dias chuvosos, aparecem problemas como a diminuição da aderência pneu-pavimento, acarretando menor segurança aos usuários da via.

2. METODOLOGIA

Com o objetivo de verificar a influência do ruído pneu-pavimento nos revestimentos de pavimento rígido e flexível, foram determinadas três etapas para o estudo, que são: seleção e caracterização do tipo de revestimento, caracterização da textura em campo e medição do ruído pneu-pavimento.

2.1. Seleção e caracterização do tipo de revestimento

Foram selecionadas três rodovias catarinenses para as medições do ruído pneu-pavimento. Uma rodovia federal (BR-101), uma municipal (Beira-Mar Norte, Florianópolis) e uma estadual (SC-403, Florianópolis). Essas rodovias apresentam trechos em pavimento flexível e rígido.

As avaliações do ruído foram realizadas ao todo em seis trechos de revestimento (três de pavimento rígido e três de pavimento flexível), os quais foram denominados como: mistura asfáltica densa comum (MAC); asfalto-borracha (MAB); e pavimento rígido de concreto

(PRC). A Tabela 1 apresenta as características e o local de cada tipo de revestimento. Os revestimentos foram caracterizados de acordo com sua granulometria, diâmetro máximo do agregado, tipo de ligante e volume de vazios. Os dados foram retirados dos projetos disponibilizados pelas empresas executoras e pelos respectivos órgãos gestores.

Tabela 1: Características das misturas avaliadas.

Rodovia	Mistura	Ligante	Faixa Granulométrica	Tamanho Max. Agregado	Volume de vazios (%)
BR-101, Araranguá	MAC	Ligante 50/70 pen	B DNIT	19,0 mm	4,0
SC 403, Florianópolis	MAB	Ligante borracha (3G)	D DEINFRA	19,0 mm	3,5
Av. Beira-Mar	MAB 1	Ligante borracha	C DNIT	19,0 mm	4,4
Túnel Antonieta de Barros, Florianópolis	PRC	-	-	-	-
Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes	PRC1	-	-	-	-
Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes	PRC2 (grinding)	-	-	-	-

O pavimento rígido do túnel Antonieta de Barros, Florianópolis, foi executado com régua vibratória manual e a textura com vassoura de piaçava no sentido transversal. O pavimento rígido do túnel Morro Agudo, em Paulo Lopes, foi avaliado no sentido sul da rodovia e foi executado com vibro acabadora. Inicialmente as duas faixas de rolamento e acostamento receberam texturização com vassoura de piaçava no sentido transversal. Posteriormente, as superfícies das duas faixas de rolamento foram microfresadas (grinding) para corrigir a irregularidade, originando uma textura caracterizada por canais longitudinais.

2.2. Caracterização da textura em campo

A textura dos revestimentos dos pavimentos foi caracterizada aplicando o método da Mancha de Areia e utilizando as diretrizes da norma ASTM E 965. A altura da areia foi calculada de acordo com equação 1 (ASTM, 1996).

$$H = \frac{V \times 4}{D^2 \times \pi} \quad (1)$$

em que:

H: altura média da areia (mm);

V: volume de areia padrão (25000 mm³);

D: diâmetro médio da mancha de areia (mm).

2.3. Medição do ruído pneu-pavimento

Foram realizadas as medições do ruído pneu-pavimento utilizando o método do Trailer-CPX. Esse trailer foi especialmente projetado para simular um eixo padrão de um veículo de passeio, em que microfones são instalados no interior do trailer, próximos aos pneus. O trailer possui uma proteção contra o ruído proveniente dos outros veículos e ainda com as paredes internas

revestidas de material absorvente sonoro para redução das reflexões da cavidade interna do trailer.

Esse ensaio é conduzido pela norma ISO 11819-2 (ISO, 2010). As medições foram realizadas na velocidade de referência de 80 km/h e utilizando os dois pneus de referência (SRTT e AVON) (Figura 1). O pneu SRTT (a) representa o ruído gerado pelos veículos leves, enquanto que o pneu Avon (b) é o mais apropriado para representar o ruído gerado pelos caminhões (Morgan *et al.*, 2009).



Figura 1: Pneus de referência do trailer CPX: (a) ASTM SRTT e (b) Avon AV4 (Bühlmann *et al.* 2013).

Antes de cada medição os microfones e os pneus de referência foram calibrados (29 psi, como prescreve a norma ISO 11819-2). Para cada medição era verificada a temperatura ambiente pois a mesma tem influência nos resultados das medições. Para determinação dos índices acústicos os valores foram corrigidos para uma temperatura de referência de 20 °C.

Com o trailer foi possível fazer a medição simultânea dos níveis de pressão sonora com quatro microfones, sendo posicionados dois microfones para cada pneu a 20 cm do chassi e a 20 cm do pneu, com altura de 10 cm do chão.

Para cada pneu de referência foram realizados dois ensaios (o valor da diferença entre as duas medições não pode ultrapassar de 0,5 dBA) exatamente nos segmentos em que a textura do revestimento foi caracterizada. Com o objetivo de caracterizar acusticamente os pavimentos estudados foi determinado o índice "Close-Proximidade Sound Index (CPXI)". Esse índice é a média entre os dois valores finais do nível de pressão sonora L_{cpx} do pneu de referência, para veículos leves (L_P) e para veículos pesados (L_H). O L_{cpx} é a média do nível de pressão sonora calculada ao longo da seção de teste, a cada 20 metros para uma velocidade de referência (40, 50, 80 e 100 km/h) (ISO, 2010).

O L_{cpx} é a soma energética dos níveis de pressão sonora dB(A) entre 315 e 5.000 Hz. A equação 2 mostra o cálculo do L_{cpx} (ISO, 2010).

$$L_{cpx_{t,w,r,i}} = 10 \cdot \log \left(\sum_{315}^{5000} 10^{0,1(L_{cpx_{t,w,r,i,f}})} \right) \quad (2)$$

em que:

t: tipo de pneu;

w: lado do pneu (direito ou esquerdo);

r: número de ensaios;

i: número do segmento;

f: frequência central da banda de terço de oitava (Hz).

A média dos dois microfones para cada pneu de referência e para o pneu do lado esquerdo e lado direito é realizada de acordo com a equação 3

$$L'cpX_{t,w,r,i,f} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{2} \sum_{m=M1}^{M2} 10^{0,1(LcpX_{t,w,r,i,f,m})} \right) \quad (3)$$

em que:

M1: microfone 1;

M2: microfone 2.

Ainda foi realizada a correção do LcpX para velocidade e temperatura de acordo com a equação 4 (ISO, 2010).

$$LcpX_{t,v,w,r,i} = LcpX_{t,v,w,r,i} - B \cdot \log \left(\frac{v_{t,w,r,i}}{V} \right) + CT_i (20 - T_i) \quad (4)$$

em que:

t: tipo de pneu;

w: lado do pneu (direito ou esquerdo);

v: velocidade do ensaio;

V: velocidade de referência;

i: número do segmento;

r: número de ensaios;

B: coeficiente de velocidade;

T_i: temperatura do ensaio;

CT_i: coeficiente de temperatura.

Em seguida, o LcpX é calculado para cada tipo de pneu e para uma velocidade de referência através da equação 5 (ISO, 2010).

$$LcpX_{t,v} = \frac{1}{n_r} \sum_{r=1}^{n_r} \left(\frac{1}{n_i} \sum_{i=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} \sum_{w=L,R} LcpX_{t,w,r,i,v} \right) \right) \quad (5)$$

em que:

t: tipo de pneu;

w: lado do pneu (direito ou esquerdo);

V: velocidade de referência;

i: número do segmento;

r: número de ensaios;

L: pneu lado esquerdo;

R: pneu lado direito.

Por fim, para o cálculo do CPXI, os dois valores finais LcpX de cada pneu de referência é aplicada na equação 6 (ISO, 2010).

$$CPXI = 0,5 \cdot L_p + 0,5 \cdot L_H \quad (6)$$

em que:

L_p: LcpX do pneu de referência dos veículos leves;

L_H: LcpX do pneu de referência dos veículos pesados.

A Figura 2 apresenta o Trailer-CPX fabricado no Brasil. O sistema de medição é composto por um analisador FFT de quatro canais sincronizados de 24 bits, conexão ICP, modelo 01dBsuite. Os quatro microfones são de precisão de ½ polegada para incidência de campo livre foram da

marca GRAS, tipo 46AE. Também é utilizado um computador portátil com o software dBFA32 para aquisição e análise dos dados coletados.



Figura 2: Trailer-CPX e instalação dos microfones

3. RESULTADOS

3.1. Ensaio de caracterização da textura

Para cada tipo de revestimento foram realizados três ensaios da mancha de areia com no mínimo de quatro leituras do diâmetro. A altura da macrotextura (H) foi calculada de acordo com a equação 1. A Figura 3 mostra o ensaio realizado em alguns dos revestimentos estudados, por exemplo, o asfalto-borracha da Beira-Mar (MAB1), pavimento rígido de concreto (PRC) e a mistura asfáltica densa comum (MAC). Na Tabela 2 são apresentados os valores das alturas da macrotextura dos revestimentos asfálticos (H), o número N, a idade do revestimento e os resultados do descritor CPXI, em dB (A), da medição do ruído pneu-pavimento.

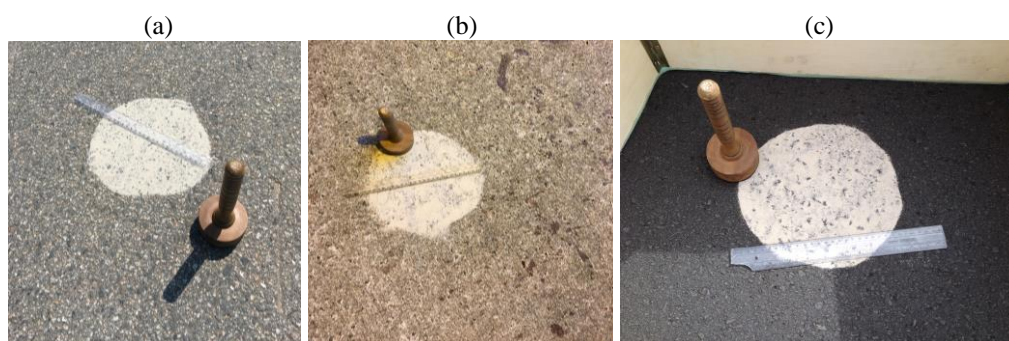


Figura 3: Ensaio da mancha de areia para os revestimentos do tipo: a) MAB1, b) PRC e c) MAC.

Tabela 2: CPXI dos revestimentos de pavimento

Revestimento	Tráfego $N_{8,2t}$	Idade (anos)	H (mm)	CPXI (dB(A))
MAB	$1,7 \times 10^7$	1	0,63	97,9
MAB1	3×10^7	4	0,56	97,8
MAC	$1,7 \times 10^8$	2	0,56	97,7

Os resultados apresentados das macrotexturas das misturas asfálticas foram parecidos. Com isso, a parcela do ruído gerado pelos mecanismos mecânicos de impactos e choques foi semelhante entre os revestimentos. Sendo que todos os revestimentos têm baixa porosidade, o ruído de geração mecânica se torna dominante e, portanto, os revestimentos apresentam nível de pressão sonora praticamente iguais.

3.2. Medição do ruído pneu-pavimento

As Figuras 4 e 5 apresentam o nível de pressão de cada revestimento asfáltico nas bandas de terço de oitava entre 315 e 5000 Hz, para o pneu de referência SRTT e AVON, respectivamente. A Tabela 2 apresenta o valor final do índice de ruído CPXI de cada revestimento calculado.

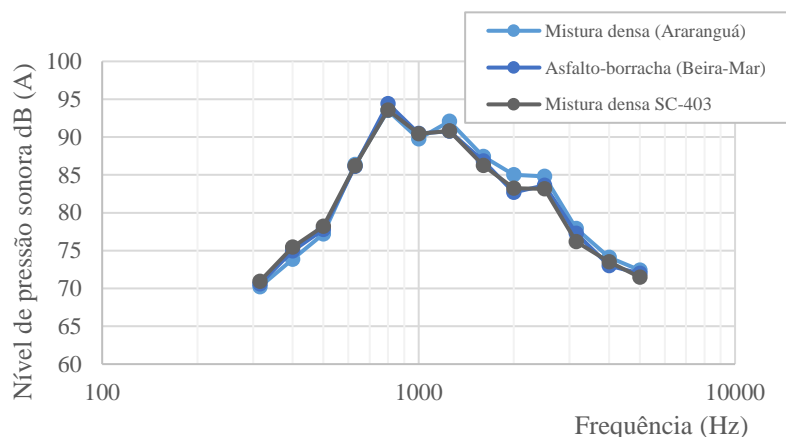


Figura 4: Nível de pressão sonora L_{cpX} de revestimentos asfálticos e do pneu de referência AVON, na velocidade de 80 km/h.

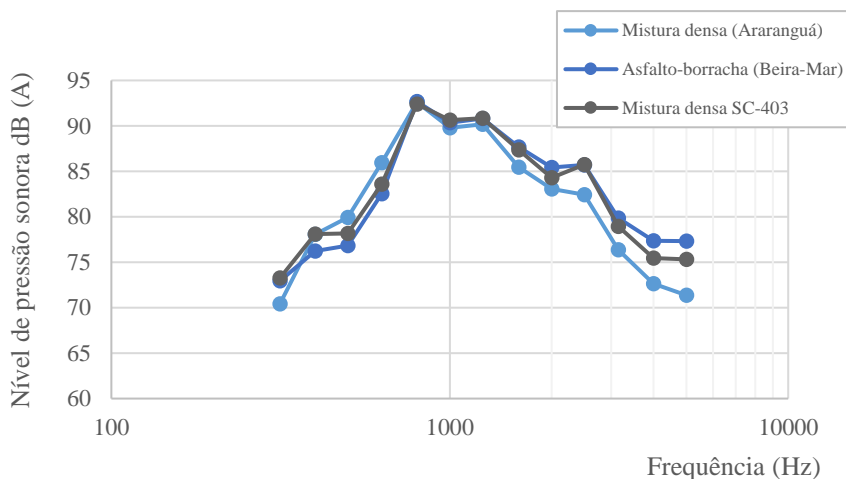


Figura 5: Nível de pressão sonora L_{cpX} de revestimentos asfálticos e do pneu de referência SRTT, na velocidade de 80 km/h.

Os resultados mostraram que os valores maiores do nível de pressão sonora ficaram entre 800 e 1000 Hz para todas as misturas asfálticas estudadas.

As misturas asfálticas apresentaram resultados em torno de 98 dB(A) do CPXI e os respectivos níveis de pressão sonora na faixa entre 315 e 5000 Hz permaneceram bem próximos. Isto pode

ser explicado porque os valores da altura da macrotextura (H) se mantiveram entre 0,56 e 0,63 mm e a porcentagem de volume de vazios variou apenas entre 3,5 e 4,4 % (ver Tabela 1).

As Figura 6 e 7 apresentam os resultados dos níveis de pressão sonora L_{cp} em função da frequência dos pavimentos rígidos PRC, PRC1 e PRC2, na velocidade de 80 km/h, para os pneus AVON e SRTT, respectivamente. Na Tabela 3 são mostrados os valores da altura da macrotextura (H) e do Close-Proximidade Sound Index (CPXI) para os pavimentos rígidos PRC1, PRC e PRC2. Os resultados do L_{cp} mostram que não existe diferença significativa nos valores do CPXI para os três pavimentos rígidos avaliados e as curvas do L_{cp} na frequência entre 315 e 5000 Hz foram semelhantes para os três revestimentos.

A faixa microfresada do revestimento PRC2 apresentou a altura da mancha de areia maior que os outros dois revestimentos, entretanto isso não acarretou em um aumento do ruído de geração mecânica de impactos e choques. Isso pode ser explicado pois a microfresagem foi realizada no sentido longitudinal da faixa. Com isso a passagem do pneu sobre o revestimento não causa nenhum tipo a mais de vibração (geração de ruído mecânico) em relação a um revestimento sem a microfresagem.

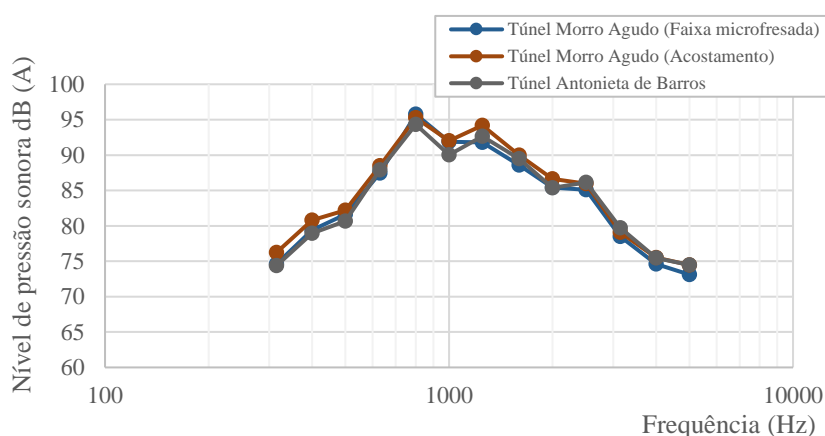


Figura 6: Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu AVON (pavimento rígido).

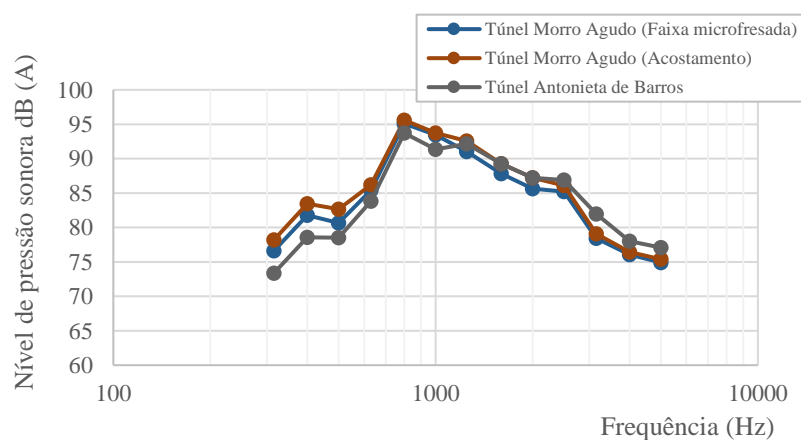


Figura 7: Resultados do nível de pressão sonora para velocidade de 80 km/h pneu SRTT (pavimento rígido).

Tabela 3: CPXI do pavimento rígido para velocidade de 80 km/h.

Pavimento rígido	Mancha de areia (mm)	CPXI (dB(A))
Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes (PRC1)	0,37	99,5
Túnel Antonieta de Barros, Florianópolis (PRC)	0,43	99,0
Túnel do Morro Agudo, Paulo Lopes (PRC2) (microfresagem)	0,87	98,8

Como os revestimentos dos pavimentos apresentaram altura da macrotextura e porcentagem de volume de vazios parecidas foi possível verificar a influência da rigidez na geração do ruído pneu-pavimento. Os resultados mostraram que os pavimentos rígidos produziram maior ruído pneu-pavimento mesmo com uma textura com rugosidade mais lisa (tirando a faixa microfresada) que a dos pavimentos flexíveis (Tabela 2 e 3).

Desta forma, a alta rigidez da superfície do pavimento rígido pode ser associada ao aumento da geração de ruído. Assim, uma mistura asfáltica que apresenta menor rigidez tenderá a reduzir as forças de impacto transmitidas em um pneu diminuindo assim os níveis de vibração dos mesmos.

A impedância mecânica também pode explicar a diferença do ruído pneu-pavimento entre o pavimento rígido e flexível. Li et al., 2012 estudaram a influência da impedância mecânica em diferentes revestimentos de pavimento. Com o estudo foi possível a construção de um modelo que relaciona as propriedades mecânicas do revestimento com o ruído pneu-pavimento. Comprovando que quanto maior a impedância mecânica maior é o ruído do pneu-pavimento.

4. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram avaliadas as medições do ruído pneu-pavimento utilizando o método do Trailer-CPX para pavimentos rígidos e flexíveis, sendo usado o primeiro Trailer-CPX o qual foi construído e qualificado no Brasil de acordo com a norma ISO 11819-2 (2010).

As misturas asfálticas não apresentaram diferença significativa entre os resultados do CPXI. Isto é explicado porque os valores da altura da macrotextura (H) se mantiveram entre 0,56 e 0,63 mm e a porcentagem de volume de vazios variou apenas entre 3,5 e 4,4 %. Com isso a geração do ruído mecânico e aerodinâmico foram semelhantes.

Os resultados do ensaio com o Trailer-CPX nos pavimentos rígidos mostraram que não existiu grande diferença entre eles nos valores do índice final do ruído (CPXI), mesmo o pavimento microfresado (sentido longitudinal) apresentou uma macrotextura mais rugosa. Acredita-se que a microfresagem no sentido longitudinal não aumenta os mecanismos de geração mecânica do ruído.

Os resultados mostraram que os pavimentos rígidos produziram maior ruído pneu-pavimento mesmo com uma textura com rugosidade mais lisa que a dos pavimentos flexíveis. Isso pode ser explicado pela alta rigidez da superfície do pavimento rígido que aumenta as forças de impacto transmitidas em um pneu, aumentando assim os níveis de vibração dos mesmos. O aumento da impedância mecânica de pavimentos rígido também explica essa diferença. Quanto maior a impedância mecânica maior o ruído do pneu-pavimento.

Agradecimento

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelos recursos financeiros para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM E 965, 1996. Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. Annual Book of ASTM Standards, USA, 1996.
- Astrana Junior, C. A. L., Estudo da Absorção Sonora e Permeabilidade em Concretos Asfálticos Drenantes. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006
- Gerges, S. N. Y. Ruído - Fundamentos e Controle. 2a Edição, NR Editora. Florianópolis, 2000.
- ISO 11819-2: Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on traffic noise – Part 2: The Close Proximity Method. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland, 2010.
- Li, M., A.A.A. Molenaar, M. van de Ven, and W. van Keulen. Mechanical Impedance Measurement on Thin Layer Surface With Impedance Hammer Device. Journal of Testing and Evaluation, 2012. 40(5): p. 860-865.
- Licitra G, Teti L, Cerchiai M. A Modified Close Proximity Method to Evaluate the Time Trends of Road Pavements Acoustical Performances. Applied Acoustics, 2014.
- Morgan P, Sandberg U, Blokland GV. The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3. Inter Noise, Ottawa, Canadá, 2009.
- Rasmussen RO, Bernhard RJ, Sandberg U, Mun EP. The Little Book of Quieter Pavements. FHWA, USA. FHWA-IF-08-004. 2007.
- Sygná K, Aasvang GM, Aamodt G, Oftedal B, Krog NH. Road Traffic Noise, Sleep and Mental Health. Environmental Research. 2014.
- WHO. Burden of disease from environmental noise. Quantification of healthy life years lost in Europe. World Health Organization Regional Office for Europe. Copenhagen, Dinamarca; 2011.

Ramon Mendes Knabben (ramon.knabben@gmail.com)¹

Glicério Trichês (gliceriotriches@gmail.com)¹

Erasmó F. Vergara (efvergara@gmail.com)²

Samir N. Y. Gerges (samir.acustica@gmail.com)²

João Victor Staub de Melo (joao.victor@ufsc.br)¹

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil UFSC - Rua João Pio Duarte Silva, s/n Córrego Grande - Florianópolis/SC Brasil CEP: 88.040-900

² Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC Centro Tecnológico – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Universitário – Trindade, 88040-900 – Florianópolis/ SC – Brasil