

Estudo dos mecanismos de geração de ruído de tráfego na interface pneu-pavimento

Manoel Fernando Freire Cabral¹, Fernando Silva Albuquerque², Osvaldo de Freitas Neto³,
Tatiana Máximo Almeida Albuquerque⁴

Abstract: Traffic noise is a problem that affects the society. However, they have to establish the triggers values for minimum standards of acoustic comfort to the people. The major factor to generate traffic noise is the tire/pavement interaction for speeds higher than 40 km/h. This work presents some evaluations of noise on the tire/pavement interface for different traffic speeds (40, 60 and 80 km/h), for several types of asphalt wearing courses applied in the State of Sergipe-Brazil (conventional asphalt mix and polymer-modified hot mix asphalt, slurry seal and double bituminous surface treatment). It was observed that the noise growth is proportional to the speed increase. The noise also varies with changing parameters such as voids, surface texture and roughness. It was proposed a prediction model to quantify the noise at the tire/pavement interaction from the speed and surface characteristics of asphalt wearing courses. The designers have now additional tools to indicate alternative pavements to critical urban roads, contributing to increase the society acoustic comfort, knowing as quiet pavements.

Keywords: Traffic noise. Tire/pavement interface. Quiet pavements.

Resumo: O ruído do tráfego influencia negativamente a sociedade. Contudo, a sociedade necessita que sejam mantidos os padrões mínimos de conforto acústico para exercerem suas atividades. Quando as velocidades de tráfego superam 40 km/h, a principal parcela do ruído por ele gerado é referente à interação pneu-pavimento. Neste trabalho são apresentadas algumas avaliações de ruído gerado na interface pneu-pavimento a diferentes velocidades de tráfego (40, 60 e 80 km/h), para vários tipos de revestimentos asfálticos aplicados no estado de Sergipe (misturas asfálticas convencionais e com ligantes modificados por polímeros, pré-misturados a frio e tratamentos superficiais). Observou-se que o aumento do ruído é diretamente proporcional ao aumento da velocidade de tráfego, variando também com a mudança de características de revestimentos asfálticos, tais como o índice de vazios, a textura superficial e a irregularidade longitudinal. Foi proposto um modelo de previsão para quantificar o Nível de Pressão Sonora (NPS) na interface pneu-pavimento a partir das características superficiais do revestimento asfáltico e da velocidade, fornecendo subsídios para que os projetistas possam indicar alternativas de pavimentação mais adequadas ao conforto acústico da sociedade, conhecidas por pavimentos silenciosos.

Palavras-chave: Ruído de tráfego. Interface pneu-pavimento. Pavimentos silenciosos.

1 INTRODUÇÃO

A poluição sonora gerada pelo tráfego de veículos em vias urbanas atinge a população e interfere diretamente na sua qualidade de vida. Dentre as fontes geradoras de ruído de tráfego, Hanson e James (2004) mencionam que a interface pneu-pavimento é a principal para veículos em velocidades superiores a 40 km/h, especialmente em veículos leves, os quais são predominantes em ambientes urbanos. Para veículos pesados, nesta velocidade, há predominância do ruído do motor.

Em níveis altos, por longos períodos de tempo, o ruído pode causar perda de audição e efeitos adversos à saúde, como hipertensão. Em

publicação da Organização Mundial da Saúde (OMS) (Concha-Barrientos et al., 2004), afirma-se que o Nível de Pressão Sonora (NPS) acima de 55 dB(A) pode causar perturbações ao ser humano. Níveis superiores a 55 dB(A) ocasionam estresse leve acompanhado de desconforto. O limiar para o início de perda de audição é 75 dB(A), onde valores superiores ao citado aumentam também o risco de infarto, derrame cerebral, infecções, hipertensão arterial e outras patologias.

Mesmo em amplitudes mais moderadas (abaixo de 70 dB(A)), o ruído pode causar interferência na fala, distúrbios de sono e irritação (Bernhard e Wayson, 2004).

Áreas de grandes investimentos imobiliários tendem a concentrar grandes volumes de tráfego em espaço reduzido. Esta realidade não é diferente na cidade de Aracaju (Sergipe), onde alguns bairros são projetados e urbanizados por empresas de incorporação imobiliária. Nestes ambientes urbanos existem infraestrutura e áreas

¹ Universidade Federal de Sergipe – E-mail: manoelcabral@ufs.br

² Universidade Federal de Sergipe – E-mail: albuquerque.f.s@uol.com.br

³ Universidade Federal de Sergipe – E-mail: osvaldocivil@yahoo.com.br

⁴ Instituto Federal de Sergipe – E-mail: tatiana.maximo@uol.com.br

de vivência adequadas, contudo as medidas para adequação do ruído gerado pelo tráfego não são previstas nos projetos elaborados, tendo em vista não haver legislação brasileira específica para este assunto, especialmente para projeto de pavimentos silenciosos. Os padrões internacionais estabelecem patamares de ruído que indicam a necessidade de medidas mitigadoras, inclusive sugestões de possíveis estratégias de engenharia, embora não estabeleçam especificações precisas que deem suporte aos projetistas na definição das soluções (FHWA, 2000). Portanto, este é um assunto um tanto quanto novo e com amplo campo para pesquisa e atuação.

Formas de mitigação desta fonte de poluição são estudadas internacionalmente. Barreiras acústicas já foram bastante empregadas (Specht et al., 2009), contudo estas representam impacto visual negativo e alteram as correntes de ar nos locais de aplicação das mesmas. Recentemente surgiu como alternativa o uso de camadas de desgaste para revestimentos com características específicas (relacionadas às magnitudes de textura do revestimento, ao índice de vazios e a rigidez), que proporcionam um melhor desempenho do pavimento em relação aos níveis sonoros (Sandberg; Ejsmont, 2002).

O *NPS* gerado na interface pneu-pavimento é a única fonte sonora controlada pela engenharia de pavimentos. Revestimentos asfálticos diferentes, a depender destas características físicas, podem promover redução de 5 a 10 dB no nível de pressão sonora (Hanson; James, 2004). Para Sandberg e Ejsmont (2002), um pavimento é considerado silencioso quando é capaz de, na interação pneu-pavimento, reduzir o ruído do veículo em pelo menos 3 dB(A) em relação ao gerado em um pavimento comum ou convencional.

Neste trabalho apresenta-se a correlação dos principais mecanismos de geração de ruído de tráfego com dados de avaliações de *NPS* na interface pneu-pavimento, realizadas em seis tipos de revestimentos asfálticos aplicados no estado de Sergipe (Concreto Asfáltico Usinado a Quente Convencional, com Ligante Modificado com Borracha de Pneu e com Ligante Modificado com

SBS, Microrevestimento Asfáltico, Tratamento Superficial Duplo e Pré-misturado a Frio), utilizando-se a metodologia de avaliação Close-Proximity (CPX). A partir destes dados, foi proposto um modelo estatístico de previsão de *NPS*, a partir da velocidade de tráfego e das características do revestimento, que servirá como ferramenta para a indicação de revestimentos “silenciosos”.

2 SOME RUÍDO

O som é formado por vibrações em corpos elásticos, mais conhecidas por vibrações sonoras, dentro de um determinado limite de frequência. A faixa de frequência sonora perceptível a audição humana está limitada entre 20 Hz e 20 KHz (Nepomuceno, 1977; Gerges, 2000).

Para quantificar o som é necessária a medição de pressão sonora. Esta é a variação média de pressão em um determinado meio (causada pelas vibrações sonoras) relacionada à pressão atmosférica, medida em Pascal ($\text{Pa} = \text{N/m}^2$). Esta é quantificada em uma escala logarítmica denominada decibel, resultando no que se chama de nível de pressão sonora, expressa na Equação (1) (ISO, 2008):

$$NPS = 20 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad (1)$$

em que:

NPS: Nível de Pressão Sonora, em dB;

P_1 : raiz média quadrática das variações dos valores instantâneos da pressão sonora ocasionada por uma fonte emissora;

P_0 : pressão de referência que corresponde ao limiar de audibilidade ($2 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2$ ou $20 \mu\text{Pa}$).

Os níveis de pressão sonora são atualmente relacionados à frequência através de três curvas de ponderação (A, B e C) (Figura 1). A curva mais utilizada por se adequar melhor às intensidades perceptíveis pelo ouvido humano, principalmente na avaliação do ruído, é a curva de ponderação A, sendo o seu valor expresso em dB(A).

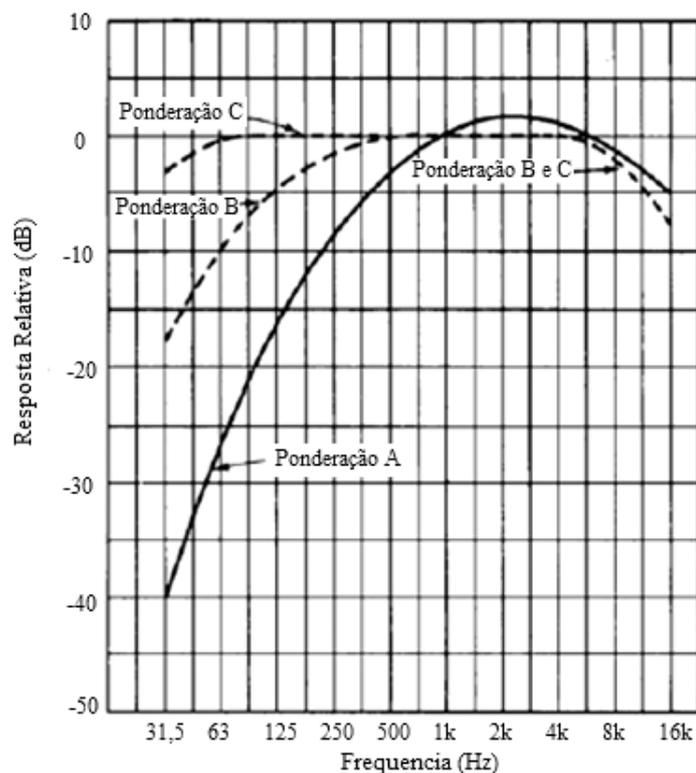


Figura 1 - Curvas de ponderação A, B e C (Irwin, 1979, apud Bernhard e Wayson, 2004)

Muitas vezes a sensação auditiva é considerada desagradável, sendo referida como ruído (FHWA, 1980). Este é originado de forma semelhante ao som, porém se distingue deste último porque seus níveis variam de maneira aleatória no tempo (Almeida et al., 1982). Contudo, como o ruído é interpretado subjetivamente, uma mesma sensação auditiva pode ter conotação diferente para cada ser humano (Almeida; Toledo, 1989). Com relação à sensação auditiva percebida pelo ser humano, gerada pelo tráfego de veículos, em geral pode-se afirmar que esta é entendida como ruído, sendo portanto indesejável.

No Brasil existe a Resolução CONAMA nº 001 de 08/03/1990 (CONAMA, 1990), que considera os problemas relativos a níveis sonoros excessivos como sujeitos a controle. A citada resolução considera que a qualidade de vida está sendo degradada em virtude da gravidade da problemática da poluição sonora nos grandes centros urbanos. A resolução apresenta critérios e padrões de forma abrangente para que estes sejam aplicados facilmente em todo o território nacional. Esta resolução considera as fontes de ruído que são prejudiciais à saúde e ao sossego público, e que a emissão de ruídos produzidos por veículos automotores obedecerão às normas expedidas pelo Conselho Nacional de Trânsito – Contran. Compete às entidades e órgãos públicos (federais, estaduais e municipais), compatibilizar o exercício

das atividades com a preservação da saúde e do sossego público.

A resolução se baseia nas normas da ABNT, NBR 10.151 (2000) – Avaliação do ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade e a NBR 10.152 (2000) – Níveis de ruído para conforto acústico. Estas normas descrevem procedimentos para medição de ruído e estabelecem limites com relação ao nível de pressão sonora tido como aceitáveis para o conforto acústico.

Estes limites são fixados de acordo com o uso da construção. Segundo a NBR 10.152 (ABNT, 2000b), o nível de pressão sonora ponderado pela curva A – dB(A) – dentro de ambientes residenciais deve ser limitado em 45 dB(A). Valores superiores a este podem causar perturbações e problemas à saúde humana.

Nos Estados Unidos, a FHWA (*Federal Highway Administration*) publicou os padrões de ruído para projetos rodoviários. É estabelecido que quando os níveis de pressão sonora produzidos pelo tráfego se aproximarem ou excederem 67 dB(A) no entorno de áreas residenciais, soluções para redução de ruído devem ser adotadas (FHWA, 2000).

O ruído de tráfego é, portanto, um aspecto gerado pela ação do homem que deve ser controlado para garantir o bem estar público. Enquanto não são desenvolvidas políticas públicas de in-

centivo ao uso de transportes coletivos ou silenciosos, a engenharia pode fornecer métodos mais econômicos para a redução dos seus efeitos.

3 PAVIMENTOS NA GERAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

Hanson, Donavon e James (2005) mostram os três mecanismos de geração de ruído pelo tráfego para veículos leves em velocidades acima

de 50 km/h (Figura 2). Neste gráfico, a parcela do ruído na interface pneu-pavimento supera o ruído do motor e aerodinâmico. Para as mesmas condições de ruído do motor e aerodinâmico apresentadas na Figura 2, o ruído gerado na interface pneu-pavimento poderia ser alterado caso as condições de superfície do pavimento, climáticas (pluviometria e temperatura) e as características do pneu (tipo e desgaste) fossem também alteradas (Specht et al., 2009).

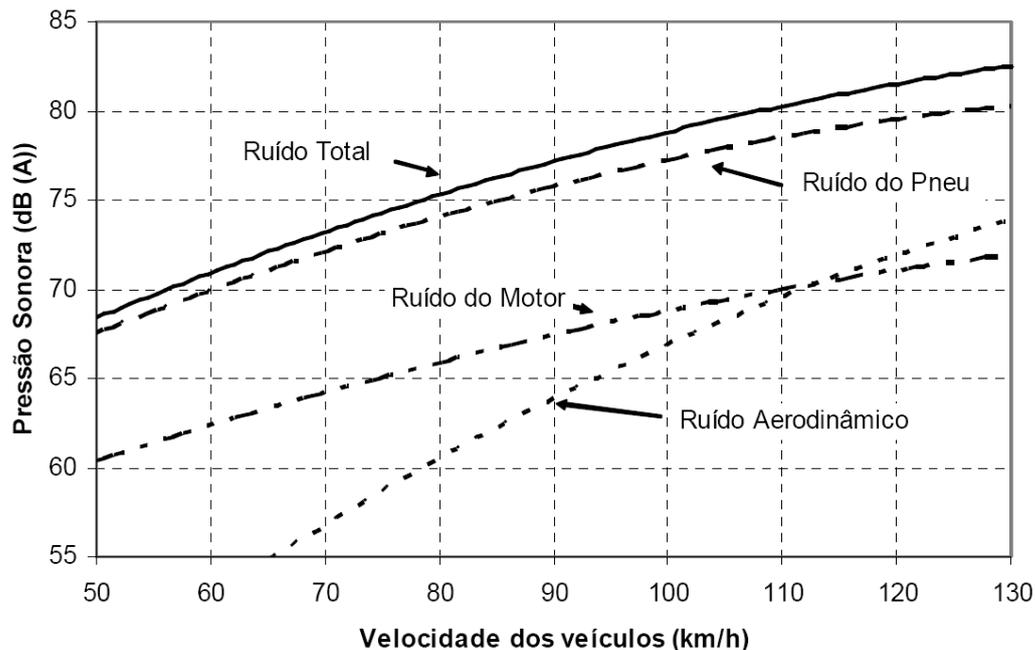


Figura 2 - Relação entre as fontes de ruído de tráfego (Modificado de: Hanson, Donavon; James, 2005)

Existem muitas características na superfície do pavimento que podem influenciar a emissão do ruído de tráfego. Dentre as características do pavimento, cada uma com sua relevância e influência na geração ou redução do ruído, podem ser destacadas a textura superficial, o volume de vazios, a espessura do pavimento, a adesão pneu-pavimento e a rigidez do revestimento (Raitanen, 2005).

Segundo Rasmussen, Bernhard e Sandberg (2007), a textura superficial é o principal fator responsável pela variabilidade no *NPS* em um pavimento, seguido do volume de vazios e da rigidez do revestimento. A textura superficial do pavimento deve condicionar características que dizem respeito ao conforto e a segurança dos usuários. A avaliação da textura é dividida em quatro escalas segundo sua faixa de comprimento (*l*): microtextura, macrotextura, megatextura e irregularidade (Tabela 1).

Tabela 1- Classificação da textura de um pavimento.

Classificação da textura	Escala de Variação
Microtextura	$l < 0,5 \text{ mm}$
Macrotextura	$0,5 \text{ mm} \leq l \leq 50 \text{ mm}$
Megatextura	$50 \text{ mm} \leq l \leq 500 \text{ mm}$
Irregularidade	$0,5 \text{ m} \leq l < 50 \text{ m}$

Fonte: Bernucci et al., 2006).

A microtextura é a rugosidade ou a aspereza da superfície individual dos agregados que compõem o revestimento. A macrotextura está relacionada ao tamanho dos agregados, aos espaços vazios existentes na superfície do revestimento e a forma geométrica de cada agregado (Bernucci et al., 2006). A megatextura é relacionada a buracos em fase acentuada de degradação, ondulações e desníveis na pista. Esta tem efeitos prejudiciais quanto ao ruído (Santos, 2007).

A irregularidade de um pavimento é definida como o desvio da superfície da rodovia com relação a um plano de referência, que afeta a dinâmica dos veículos, a qualidade de rolamento e as cargas dinâmicas sobre a via (Paterson, 1987; Dner, 1994; Albuquerque; Núñez, 2011).

Na Figura 3, percebe-se a influência da textura na geração do ruído de tráfego, sendo as faixas de comprimento de macro e megatextura os principais responsáveis por essa geração. A microtextura e a irregularidade são caracterizadas por exercerem pouca influência na geração de

ruído (Sandberg et al., 1987 apud Fehrl, 2006). Contudo, é possível afirmar que a parcela de *NPS* derivada da aderência entre pneu-pavimento deve ser maior para veículos trafegando em baixas velocidades (até de 60 km/h), sob ampla ação dos efeitos da microtextura. A irregularidade também é influenciada pelos defeitos de maiores dimensões no pavimento (Albuquerque; Núñez, 2011). Em baixas velocidades, os impactos absorvidos pelo pneu devido a irregularidade do pavimento também são responsáveis por grandes parcelas do *NPS* produzido.

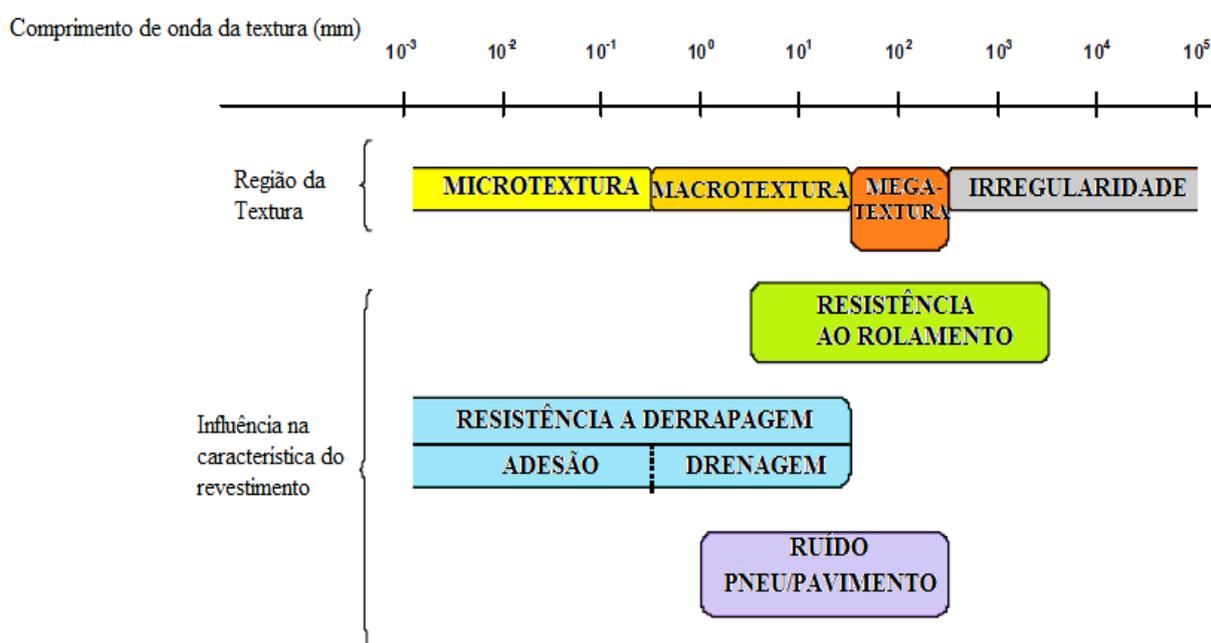


Figura 3 - Relação entre o comprimento (l) da textura e os seus efeitos nas características do pavimento (Traduzido de: Sandberg, 1987, apud Fehrl, 2006)

Segundo Freitas (2008), os valores obtidos de megatextura têm influência nos ruídos de baixa frequência, que são inferiores a 1.000 Hz, enquanto que os baixos valores da macrotextura (com altura de mancha de areia classificada como média ou inferior) têm influência na emissão dos ruídos em frequências altas, superiores a 1.000 Hz. A megatextura é fator determinante em relação ao impacto mecânico do pneumático sobre o revestimento que resulta em vibrações na carcaça do pneu. Ainda, uma macrotextura mais aberta possibilita a diminuição do ruído gerado pelo bombeamento do ar na interface pneu-pavimento.

Quanto ao índice de vazios, pavimentos porosos, com índice de vazios de 15% ou superiores, são capazes de absorver mais o som se comparados aos revestimentos tradicionais com 4 a 8% de índice de vazios. Este fato deve-se à capacidade de transformar energia sonora em ener-

gia térmica nos poros do material. O coeficiente de absorção depende, principalmente, da frequência e do ângulo de incidência das ondas sonoras na pista (Hanson; James, 2004).

A rigidez também contribui na geração do ruído na interface pneu-pavimento, porém em uma menor proporção. O que entende-se é que quanto mais elástico for o material do revestimento, maior será sua capacidade de atenuar o nível de pressão sonora, pois este será capaz de absorver mais impactos (Rasmussen et al., 2007).

4 LEVANTAMENTOS REALIZADOS

Neste trabalho, a medição de ruído foi realizada na interface pneu-pavimento, como forma de obter a parcela de contribuição de ruído que o veículo proporciona quando está em movimento, a várias velocidades (40, 60 e 80 km/h). Outras

fontes de ruído podem existir no entorno, porém estas não foram medidas, uma vez que o objetivo deste trabalho restringe-se à avaliação do ruído na interface pneu-pavimento. Para tanto, utilizou-se um método de medida que não é influenciado pelas fontes sonoras emissoras do entorno, devido a grande proximidade dos microfones à fonte emissora estudada.

Foram realizados ensaios complementares dos segmentos de estudo, nos quais foram avaliadas a microtextura, macrotextura, irregularidade longitudinal e densidade dos revestimentos. Em seguida foi avaliada a relação destes resultados e da velocidade com o *NPS* através de correlações lineares.

A microtextura do revestimento foi analisada por meio do método de ensaio com o uso do Pêndulo Britânico (ASTM-E-303-93). Este consiste em medir o valor de resistência a derrapagem (*VRD*) por meio do deslocamento de um pêndulo que é solto em movimento semicircular, cuja extremidade possui uma sapata de borracha que fricciona a superfície do revestimento, simulando a superfície de um pneumático.

A macrotextura do revestimento foi analisada por meio de medições diretas do perfil com conjunto laser, ao longo de uma distância de referência (distância de base de 10 cm), obtendo-se o *Mean Profile Depth (MPD)*. O *MPD* é calculado a partir da média das profundidades medidas neste perfil para cada metade da distância de base, conforme os procedimentos descritos na norma ASTM E-1845 de 2009 (Salgado et al., 2009).

Para as avaliações de irregularidade longitudinal (*IRI – International Roughness Index*) foi utilizado um perfilômetro inercial a laser, cujo funcionamento segue o preconizado pela norma ASTM E 950-98. O levantamento foi realizado utilizando-se 3 módulos de medição lasers verticais fixados a uma barra de suporte na dianteira do veículo, além de hodômetro e do GPS, todos estes interligados a um microcomputador com *software* para coleta de informações e para processamento dos dados.

A determinação da densidade dos revestimentos foi realizada com o medidor de densidade de asfalto não-nuclear (eletromagnético). Este equipamento mede a constante dielétrica do material produzida em um prato sensor que é apoiado sobre a superfície. Sendo a constante dielétrica do

material diretamente proporcional à densidade, é determinada a densidade do revestimento após prévia calibração do equipamento (Dias, 2005). A densidade do revestimento asfáltico traduziu, indiretamente, o seu índice de vazios. Este último não foi medido devido o estudo ter sido realizado em pavimentos já existentes, sem conhecimento das especificações de projeto e do controle de execução dos mesmos.

Também foi desenvolvido um modelo estatístico para previsão de *NPS*, a partir da velocidade de tráfego e das características dos pavimentos ($NPS = f(V, IRI, D, MPD)$). Na sequência são apresentados os métodos de avaliação realizados e uma descrição da área de estudo.

4.1 Medição de ruído na interface pneu-pavimento

O ruído foi determinado em levantamento pelo Método da Proximidade Imediata (*Close-Proximity – CPX*). Este método é normatizado pela ISO 11819-2 (ISO 1997) e consiste em medir o nível de pressão sonora gerado na interface pneu-pavimento. Na Figura 4 é possível observar o detalhe do conjunto de equipamentos utilizados no método CPX, todos acoplados ao veículo teste.

Este sistema de aquisição de dados para análise do nível de pressão sonora e espectro de frequência é constituído por 02 microfones condensadores de medição de 1/2”, com resposta de pressão otimizada e com campo de incidência de 90°, sendo um frontal e outro traseiro relativamente ao eixo do pneu, acoplados a um dispositivo instalado na roda do veículo teste. Os microfones são interligados com cabos a uma interface de áudio com pré-amplificador, conectada a um microcomputador (Figura 5). Este permite a análise do nível de pressão sonora em diversas frequências do audível (25 Hz a 25 kHz) utilizando-se o *software Realtime Analyzer – Acoustic Analyzing System 5E* (ver resposta em tempo real na Figura 6). As medidas foram realizadas em decibéis ponderadas pela curva A, com aquisição de dados a cada segundo de medição. Obteve-se uma média aritmética dos resultados gravados para o tempo de 9 segundos em cada trecho avaliado, e em cada velocidade (representando distâncias variáveis para as velocidades de 40, 60 e 80 km/h).

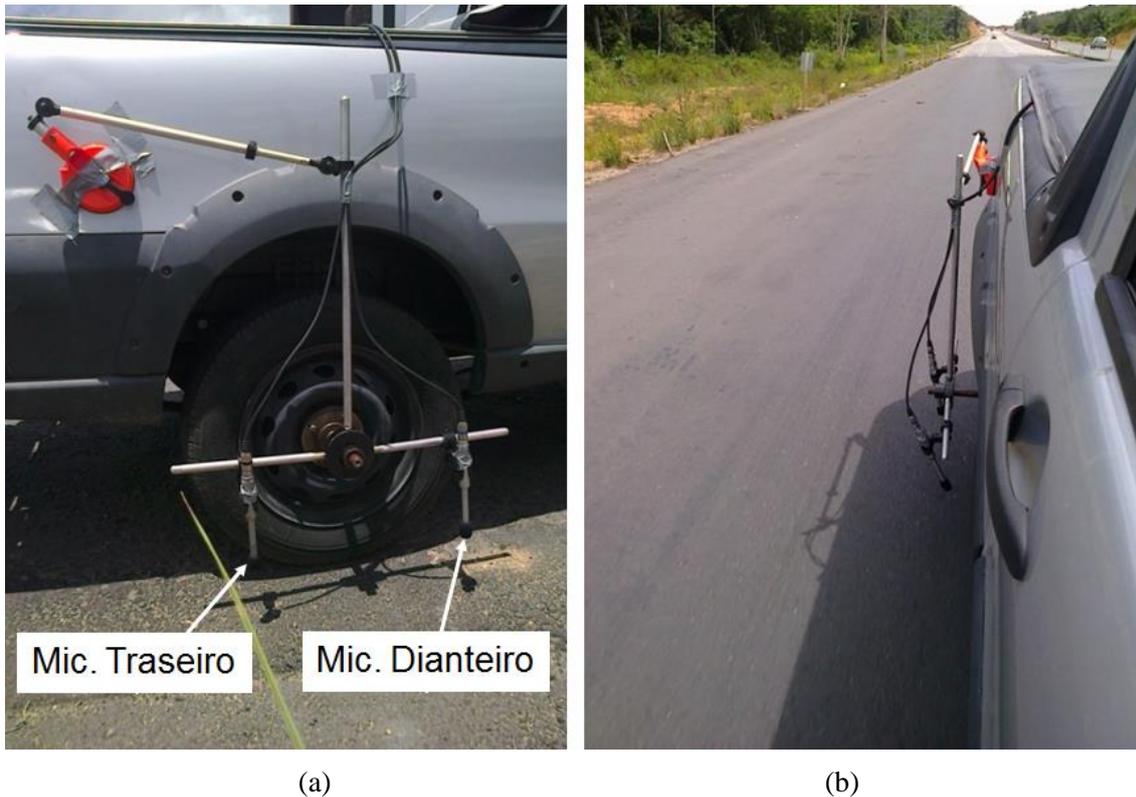


Figura 4 - (a) Equipamento CPX instalado no veículo teste (b) detalhe do equipamento durante execução dos testes

Neste método, a grande proximidade dos microfones da fonte emissora (10 cm) praticamente sobrepõe a interferência de fontes sonoras emissoras do entorno, porém a ação aerodinâmica, principalmente em altas velocidades, pode proporcionar um aumento no nível de pressão sonora registrado pelos microfones. A forma utilizada para atenuar os efeitos aerodinâmicos foi a utilização de espuma nos microfones, o que con-

siste em um mecanismo relativamente simples para transformar a energia sonora da ação do ar em energia térmica.

Outro fator importante na medição de ruído na interface pneu-pavimento, e que interfere no nível de pressão sonora gerado, é o tipo de pneu. O pneu utilizado nesta medição foi o da marca *Goodyear* 175/70R14 modelo GT2, devidamente calibrado com 28 psi de pressão.

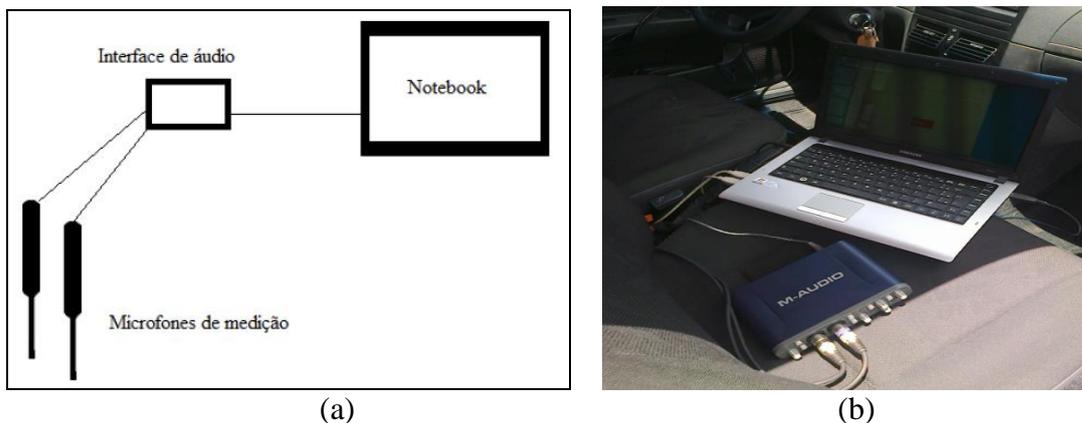


Figura 5 - Sistema de aquisição de dados de ruído utilizado na pesquisa: (a) esquema de montagem (b) sistema em funcionamento

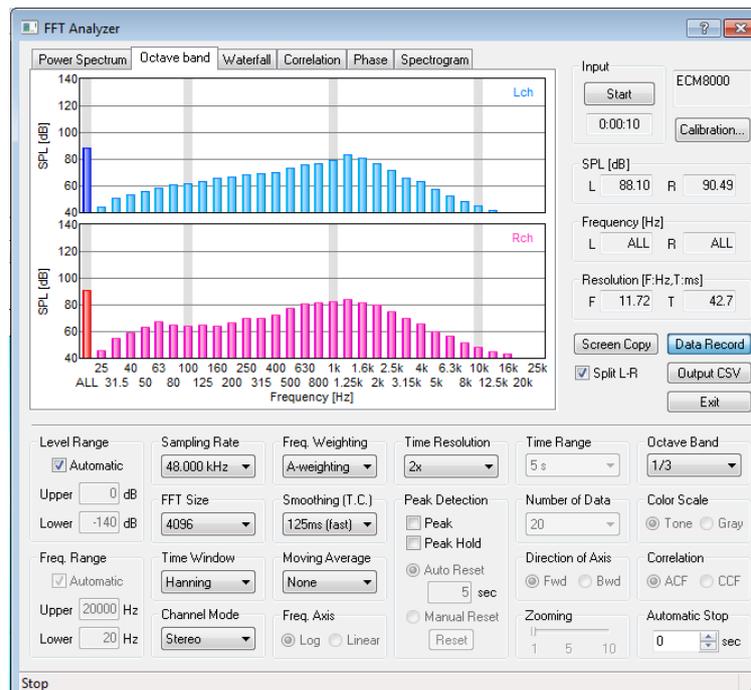


Figura 6 - Tela de avaliação e aquisição de dados de NPS a partir do software utilizado

4.2 Área de estudo

Para a aquisição de dados foram realizados levantamentos em nove segmentos teste distintos, contemplando seis tipos de revestimentos: Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CAUQ₁, CAUQ₂ e CAUQ₃), Concreto Asfáltico com ligante modificado com borracha de pneu (Asfalto Borracha - AB), Microrevestimento Asfáltico (MRA), Tratamento Superficial Duplo (TSD), Concreto Asfáltico com ligante modificado com SBS (SBS₁ e SBS₂) e Pré-Misturado a Frio (PMF).

Os pavimentos analisados eram já existentes, onde as únicas informações disponíveis eram o tempo de serviço e o tipo e a espessura do revestimento que os constituíam, não estando disponíveis as informações sobre o projeto e a execução (teor de CAP, faixa granulométrica, percentual de modificadores, índice de vazios da mistura etc.). Estes trechos estão localizados nos municípios de Aracaju, São Cristóvão e Itaporanga D'Ajuda, todos no estado de Sergipe (Figura 7).



Figura 7 - Localização dos trechos avaliados

Devido a uma limitação de tempo para a captura de dados a partir do *software Realtime Analyzer* utilizado (de apenas 9,0 segundos), a extensão máxima avaliada em cada trecho a partir da coordenada lida no GPS foi de 200 metros

(para ensaios realizados a 80 km/h), conforme Figura 8.

Para a velocidade de 40 km/h avaliou-se uma extensão de 100 metros e, para a velocidade de 60 km/h foram avaliados 150 metros.

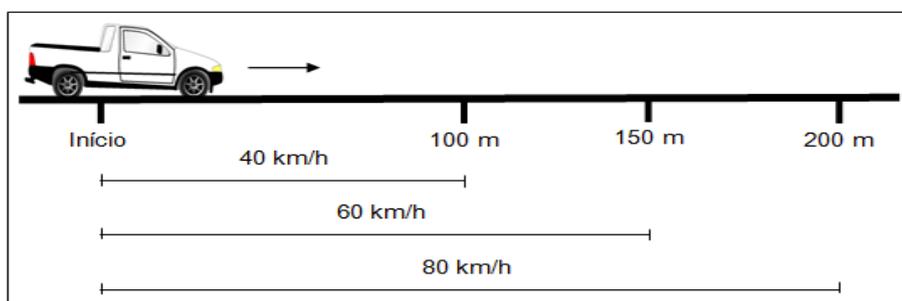


Figura 8 - Extensão dos trechos de teste para cada velocidade de tráfego

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Correlações de parâmetros avaliados com o NPS

A Tabela 2 contém os dados de *NPS* máximos de cada trecho analisado, nas frequências abaixo, acima e exatamente a 1.000 Hz, assim como de Velocidade (V), irregularidade longitudinal (IRI), macrotextura (MPD), microtextura (VRD) e densidade (ρ – termo da Engenharia Geotécnica que se refere à massa específica – parâmetro dimensional) obtidos nos segmentos teste.

Foram realizadas correlações lineares entre os parâmetros de desempenho dos pavimentos e o *NPS* para todo o conjunto de dados obtidos em campo. Este procedimento utiliza um coeficiente que indica a força e a direção do relacionamento linear entre duas variáveis aleatórias. Ele foi utilizado para avaliar a forma que cada parâmetro influencia o *NPS*, sendo estabelecida como correlação linear significativa neste trabalho os valores inferiores a $-0,5$ e superiores a $+0,5$. Estes valores de correlação significativa foram adotados mesmo sabendo-se que são relativamente baixos. Isto deve-se a grande variabilidade existente nas características das obras de pavimentação e a incerteza se a relação entre as variáveis analisadas era exatamente linear.

Na Figura 9 estão os gráficos contendo as relações entre *NPS* nas várias situações de pico, frequência e posição do microfone, e IRI , VRD , ρ e MPD (em polinômios de segunda ordem), referentes à velocidade de 40 km/h. Na Figura 10 são apresentadas graficamente as correlações lineares para estas mesmas variáveis e velocidade. Gráfi-

cos com o mesmo conteúdo, mas para velocidades distintas, são observados nas Figuras 11 e 12 (velocidade de 60 km/h) e nas Figuras 13 e 14 (velocidade de 80 km/h).

A partir das correlações lineares realizadas com os dados de *NPS* obtidos trafegando a velocidade de 40 km/h, pode-se afirmar que o *NPS* nas diversas faixas de frequência sofre forte influência da densidade, crescendo com o aumento desta, ou seja, possivelmente com a redução do índice de vazios. As demais características não apresentaram correlação significativa ($> 0,5$ ou $< -0,5$), onde o coeficiente de determinação (quadrado da correlação – R^2), que determina o relacionamento das variáveis, seria muito baixo. No caso da irregularidade longitudinal e da macrotextura, a correlação com o *NPS* é muito baixa e aleatória, devido às vibrações no pneumático serem baixas e a dissipação de ar não ser considerada um fator importante nesta velocidade.

Já na velocidade de 60 km/h, as correlações lineares realizadas indicam que o *NPS* continuou sofrendo forte influência da densidade, provocando acréscimo diretamente proporcional, principalmente nas frequências até 1.000 Hz. Tal fato já era esperado, tendo em vista a redução do contato pneu-pavimento nesta velocidade, o que proporciona menor absorção de ar deslocado pelas ondas sonoras no interior do revestimento asfáltico, fenômeno este captado pelo microfone traseiro, já que o dianteiro refere-se às questões aerodinâmicas.

Tabela 2 - Resumo dos dados obtidos nos levantamentos de campo

Trecho/Revestimento	V (km/h)	IRI (m/km)	Classificação (Irregularidade)	VRD	Classificação (Microtextura)	MPD (mm)	Classificação (macrotextura)	ρ (kg/m ³)	Pico NPS (dB(A))	NPS D ₁ (dB(A))	NPS D ₂ (dB(A))	NPS ₁₀₀₀ (dB(A))	NPS T ₁ (dB(A))	NPS T ₂ (dB(A))
CAUQ ₁	40	3,12		55,03		0,91		2.279,55	84,08	84,08	83,64	84,08	81,57	82,83
	60	3,58	RUIM	55,03	RUGOSA	0,85	GROSSEIRA OU ABERTA	2.279,55	89,40	88,99	89,40	88,99	86,77	88,53
	80	3,82		55,03		0,85		2.279,55	93,30	92,89	93,30	92,89	90,71	92,78
CAUQ ₂	40	1,46		-		0,75		2.403,45	93,75	90,35	90,31	93,75	93,75	92,81
	60	1,53	EXCELENTE	-	-	0,71	MÉDIA	2.403,45	97,03	94,36	94,92	94,36	97,03	96,13
	80	1,62		-		0,75		2.403,45	104,20	102,37	102,81	104,09	104,09	104,20
CAUQ ₃	40	2,37		39,33		0,68		2.394,70	89,15	88,92	89,15	88,92	87,73	86,26
	60	2,35	BOM	39,33	LISA	0,71	MÉDIA	2.394,70	93,40	91,84	93,40	92,47	92,47	91,75
	80	2,36		39,33		0,92		2.394,70	98,00	96,84	98,00	97,26	97,26	96,75
AB	40	4,49		64,90		0,96		2.279,09	80,46	80,03	80,46	80,03	76,36	76,76
	60	4,99	PÉSSIMO	64,90	RUGOSA	0,93	GROSSEIRA OU ABERTA	2.279,09	89,38	88,52	88,45	88,52	89,38	86,78
	80	4,81		64,90		0,90		2.279,09	93,73	93,14	92,68	92,98	93,73	91,35
MRA	40	3,23		77,03		1,12		2.272,29	86,19	86,19	83,98	86,19	83,60	84,59
	60	3,11	REGULAR	77,03	MUITO RUGOSA	1,19	GROSSEIRA OU ABERTA	2.272,29	94,16	94,16	92,81	94,04	84,97	85,98
	80	3,03		77,03		1,22		2.272,29	99,78	99,78	98,32	99,78	97,34	97,62
TSD	40	3,05		71,03		1,89	MUITO GROSSEIRA OU MUITO ABERTA	2.264,15	85,61	82,39	85,33	82,61	82,61	85,61
	60	2,44	REGULAR	71,03	RUGOSA	1,96	GROSSEIRA OU MUITO ABERTA	2.264,15	83,99	80,11	83,16	80,77	80,77	83,99
	80	2,68		71,03		2,00		2.264,15	83,91	79,44	83,12	80,46	80,46	83,91
SBS ₁	40	3,53		47,13		0,52		2.340,00	85,31	84,98	84,69	84,98	81,85	85,31
	60	3,61	REGULAR	47,13	MEDIANAMENTE RUGOSA	0,50	MÉDIA	2.340,00	89,63	89,54	89,63	89,54	85,88	88,98
	80	3,33		47,13		0,50		2.340,00	94,92	94,92	94,48	94,92	91,34	94,13
SBS ₂	40	2,08		42,83		0,55		2.307,00	82,64	82,64	81,87	82,64	78,97	81,42
	60	2,08	BOM	42,83	INSUFICIENTEMENTE RUGOSA	0,55	MÉDIA	2.307,00	89,73	89,73	88,89	89,73	86,09	88,17
	80	2,18		42,83		0,54		2.307,00	95,48	95,26	95,48	95,26	91,03	94,33
PMF	40	9,86		45,13		0,78		2.160,45	87,82	87,82	87,79	87,82	85,60	84,73
	60	10,25	PÉSSIMO	45,13	INSUFICIENTEMENTE RUGOSA	0,79	GROSSEIRA OU ABERTA	2.160,45	94,12	94,12	93,05	94,12	91,27	92,48
	80	9,85		45,13		0,85		2.160,45	101,59	101,48	101,59	101,48	99,01	98,17

em que:

IRI: Irregularidade longitudinal;

VRD: Valor de Resistência a Derrapagem;

ρ : Densidade;

MPD: Valor de macrotextura em termos de *Mean Profile Depth*;

Pico *NPS*: Maior *NPS* de todas as frequências;

NPS D₁: Maior *NPS* para o microfone dianteiro até 1.000 Hz;

NPS D₂: Maior *NPS* para o microfone dianteiro acima de 1.000 Hz;

NPS₁₀₀₀: Maior *NPS* a 1.000 Hz;

NPS T₁: Maior *NPS* para o microfone traseiro até 1.000 Hz;

NPS T₂: Maior *NPS* para o microfone traseiro acima de 1.000 Hz.

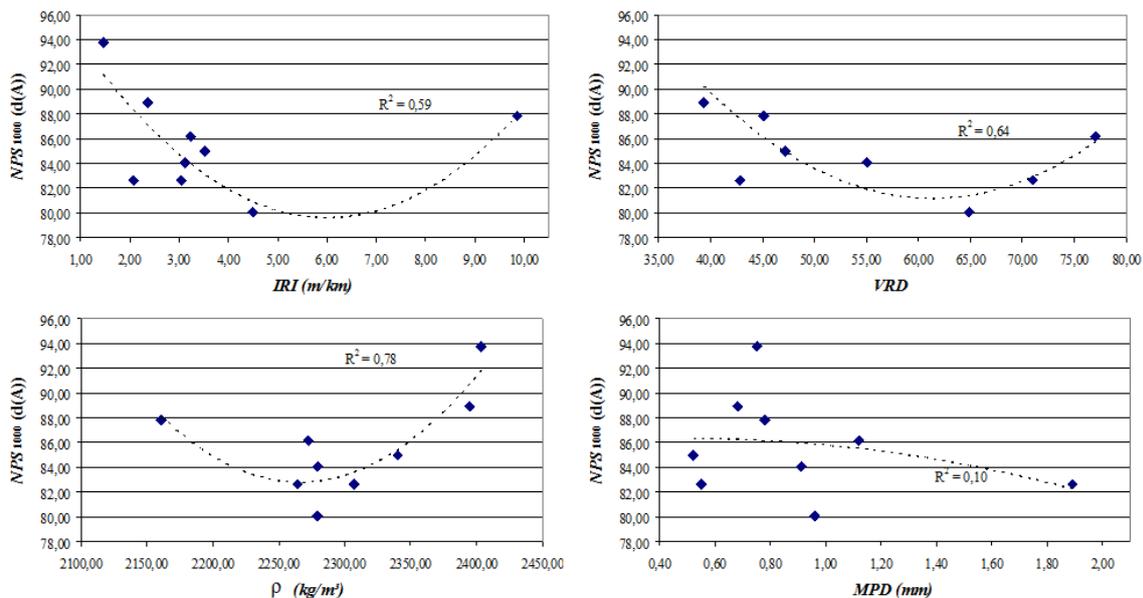


Figura 9 - Relações entre NPS e IRI, VRD, ρ e MPD na velocidade de 40 km/h

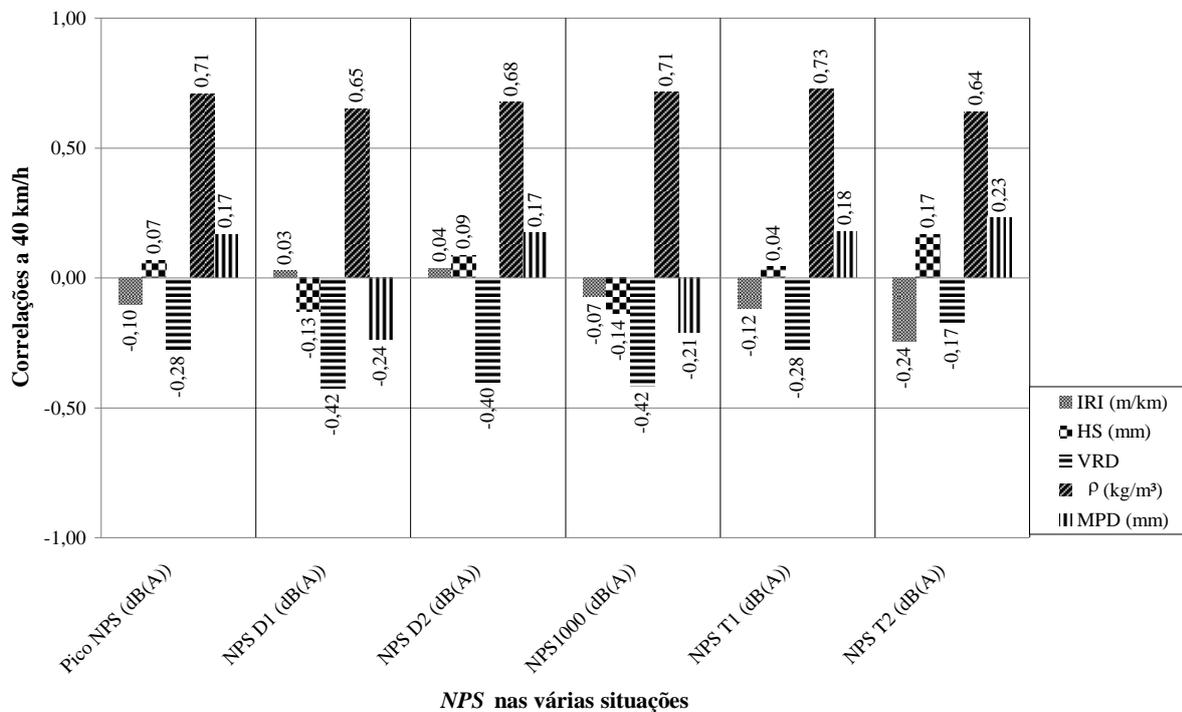


Figura 10 - Correlações entre NPS e IRI, VRD, ρ e MPD na velocidade de 40 km/h

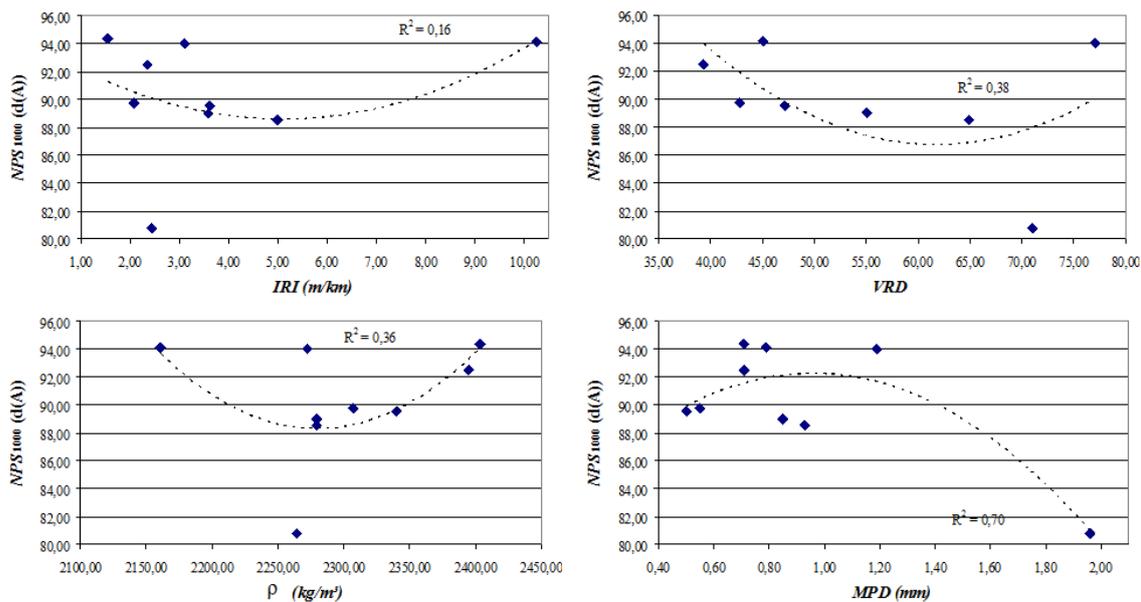


Figura 11 - Relações entre NPS e IRI, VRD, ρ e MPD na velocidade de 60 km/h

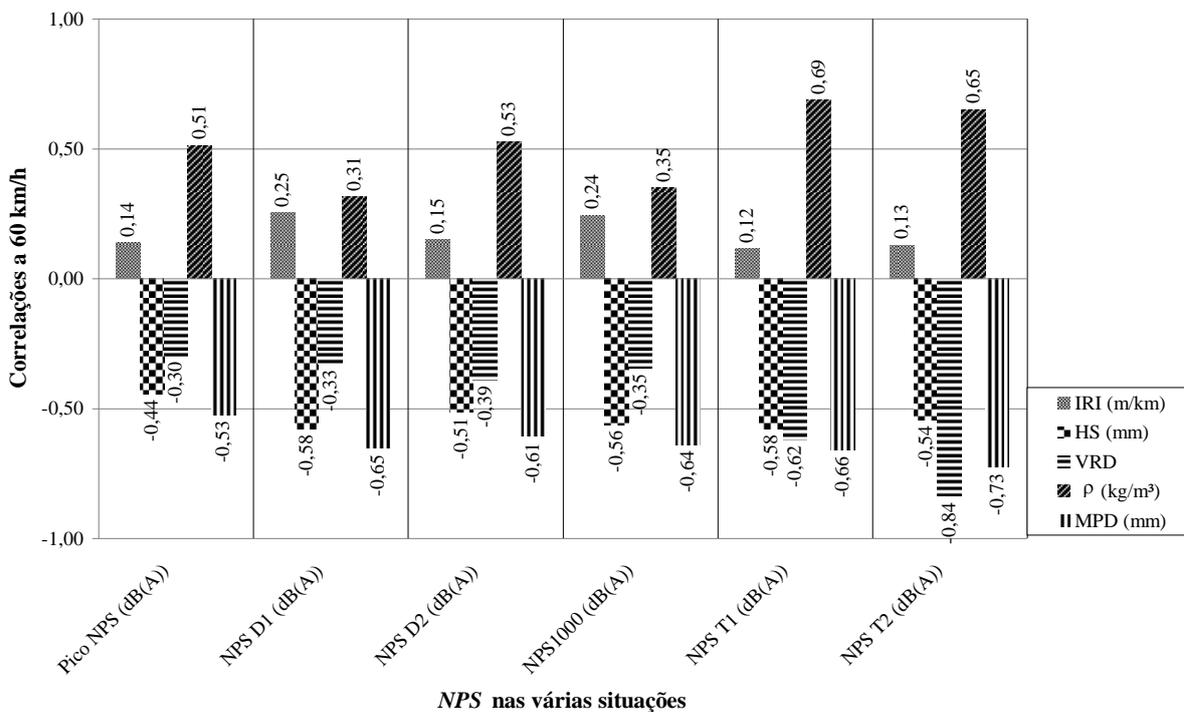


Figura 12 - Correlações entre NPS e IRI, VRD, ρ e MPD na velocidade de 60 km/h

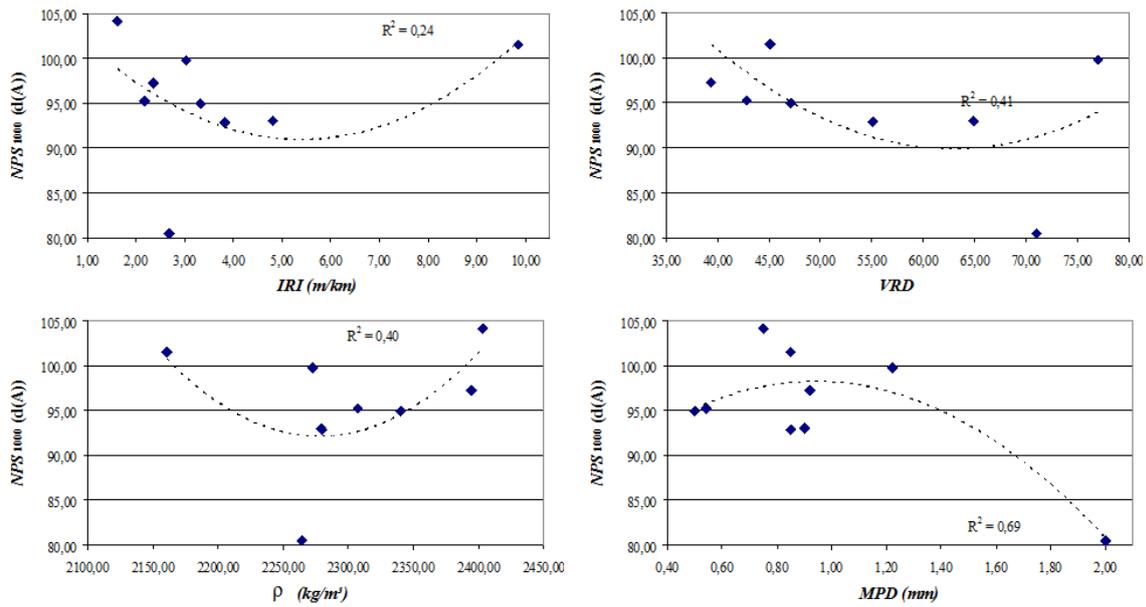


Figura 13 - Relações entre NPS e IRI, VRD, ρ e MPD na velocidade de 80 km/h

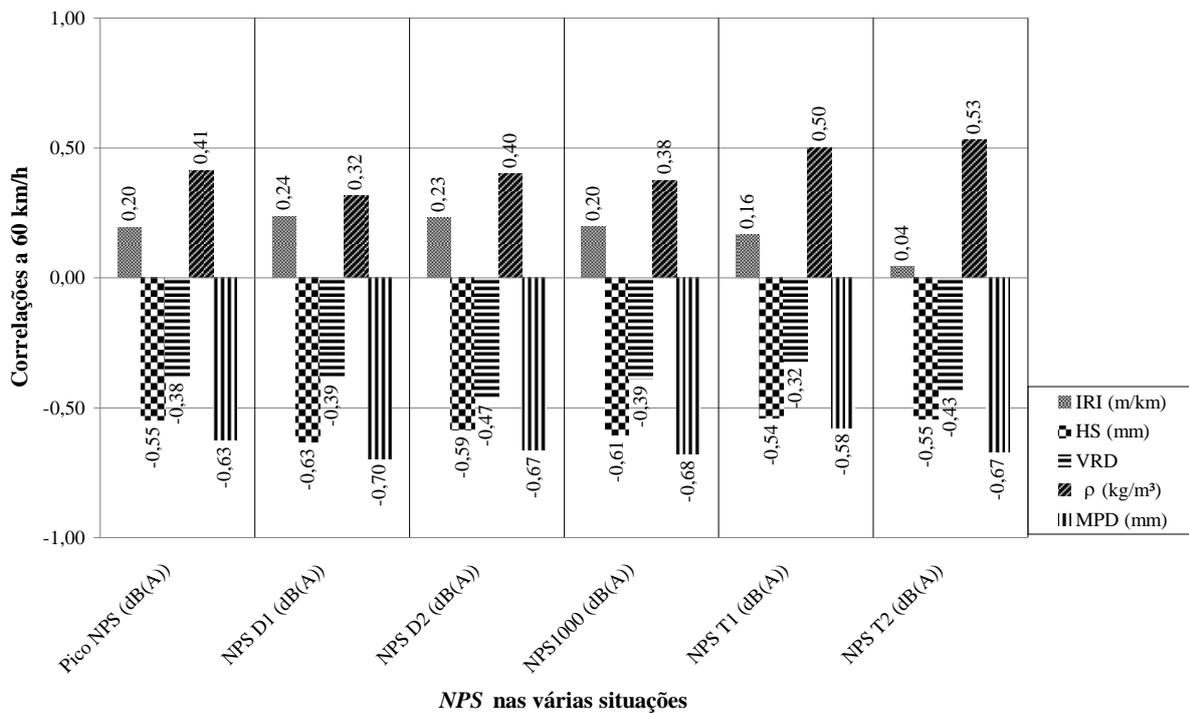


Figura 14 - Correlações entre NPS e IRI, VRD, ρ e MPD na velocidade de 80 km/h

Nesta velocidade (60 km/h) percebe-se, também, significativa influência da macrotextura. Esta relação, que é inversamente proporcional (correlação $< -0,5$), ou seja, quanto maior a macrotextura menor foi o NPS emitido. Possivelmente, com o aumento da velocidade a macrotextura propiciou maior dissipação do ar entre o pneu e o pavimento, favorecendo a redução dos ruídos aerodinâmicos.

Ainda observou-se uma forte correlação negativa do NPS captado pelo microfone traseiro com o VRD. Possivelmente, a microtextura deve

ter favorecido a redução do NPS nesta velocidade devido o pneu permanecer em contato com o pavimento, inibindo os efeitos de adesão/deslizamento.

Para os resultados da correlação na velocidade de 80 km/h, o NPS praticamente não sofreu influência da densidade. Apenas influenciando, em menor proporção que em velocidades mais baixas, nos ruídos captados pelo microfone traseiro. Acredita-se que, com a redução do contato entre o pneu e o pavimento, em velocidades mais elevadas, a dissipação do ar nos vazios do

revestimento seja menos importante, sendo esta mais influenciada pela macrotextura, pela sua proximidade ao pneu.

Na velocidade de 80 km/h pode-se reafirmar a significativa influência da macrotextura. Esta relação cresceu em relação à observada a velocidade de 60 km/h, principalmente para o *NPS* a 1.000 Hz (de 0,65 a 60 km/h para 0,68 a 80 km/h). Este fato favoreceu a atenuação da geração de ruído, devido a maior dissipação do ar entre o pneu e o pavimento, com a redução dos ruídos aerodinâmicos.

As correlações de *NPS* com o *IRI* são diretamente proporcionais. Esta relação, quando obtida para todo o conjunto de dados foi baixa. Contudo, foi realizada neste trabalho uma avaliação adicional, quando correlacionou-se o *NPS* com o *IRI* individualmente para cada trecho avaliado, com os valores variando de acordo com a velocidade. O resumo dos dados, a análise estatística e os resultados destas correlações estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Correlações lineares entre *NPS* e *IRI* para cada segmento avaliado

Dados e estatísticas de <i>IRI</i>										
Item		CAUQ1	CAUQ2	CAUQ3	AB	MRA	TSD	SBS1	SBS2	PMF
IRI (m/km)	40 km/h	3,12	1,46	2,37	4,49	3,23	3,05	3,53	2,08	9,86
	60 km/h	3,58	1,53	2,35	4,99	3,11	2,44	3,61	2,08	10,25
	80 km/h	3,82	1,62	2,36	4,81	3,03	2,68	3,33	2,18	9,85
Média (m/km)		3,51	1,54	2,36	4,76	3,12	2,72	3,49	2,11	9,99
Desv. Pad. (m/km)		0,36	0,08	0,01	0,25	0,10	0,31	0,14	0,06	0,23
Coefficiente de Variação (%)		10,1	5,2	0,4	5,3	3,2	11,3	4,1	2,7	2,3
Coeficientes de Correlação entre <i>IRI</i> e <i>NPS</i>										
<i>NPS</i>		CAUQ1	CAUQ2	CAUQ3	AB	MRA	TSD	SBS1	SBS2	PMF
Pico NPS (dB(A))		1,00	0,99		0,77		0,90			
NPS D₁ (dB(A))		0,99	0,99	Não consistente	0,75	Não consistente	0,81	Não consistente	Não consistente	Não consistente
NPS D₂ (dB(A))		1,00	1,00	Não consistente	0,76	Não consistente	0,91	Não consistente	Não consistente	Não consistente
NPS₁₀₀₀ (dB(A))		0,99	0,92	Não consistente	0,76	Não consistente	0,86	Não consistente	Não consistente	Não consistente
NPS T₁ (dB(A))		1,00	0,99	Não consistente	0,82	Não consistente	0,86	Não consistente	Não consistente	Não consistente
NPS T₂ (dB(A))		1,00	0,99		0,78		0,90			

A elevação do *NPS* com o aumento do valor de *IRI*, nos segmentos CAUQ1, CAUQ2, AB e TSD, pode ter sido causado pelo aumento dos impactos entre o pneu e o pavimento, contribuindo para o aumento do *NPS*. Esta evidência diverge com o afirmado por Sandberg (1987), que a irregularidade longitudinal não interfere na geração de ruído na interface pneu-pavimento.

Os coeficientes de correlação linear não foram analisados para os segmentos CAUQ3, MRA, SBS1, SBS2 e PMF, devido aos coeficientes de variação dos dados (relação entre o desvio padrão da amostra e sua média) serem muito baixos (menores do que 5% – ver Tabela 3). Nestes

segmentos os valores obtidos em cada velocidade (40, 60 e 80 km/h) estavam muito próximos da média, quando qualquer variação do *NPS* provavelmente não tinha relação com o *IRI*, que nestes casos era pouco variável. Portanto a correlação linear foi dita inconsistente nestes segmentos.

Na Figura 15 é possível identificar a forte correlação (>0,5) positiva do *NPS* com a velocidade. Há um aumento da vibração do pneumático com o acréscimo da velocidade, favorecendo a ocorrência de fenômenos mecânicos (vibrações radiais, deslizamento / adesão e adesividade), contribuindo para o aumento do *NPS*.

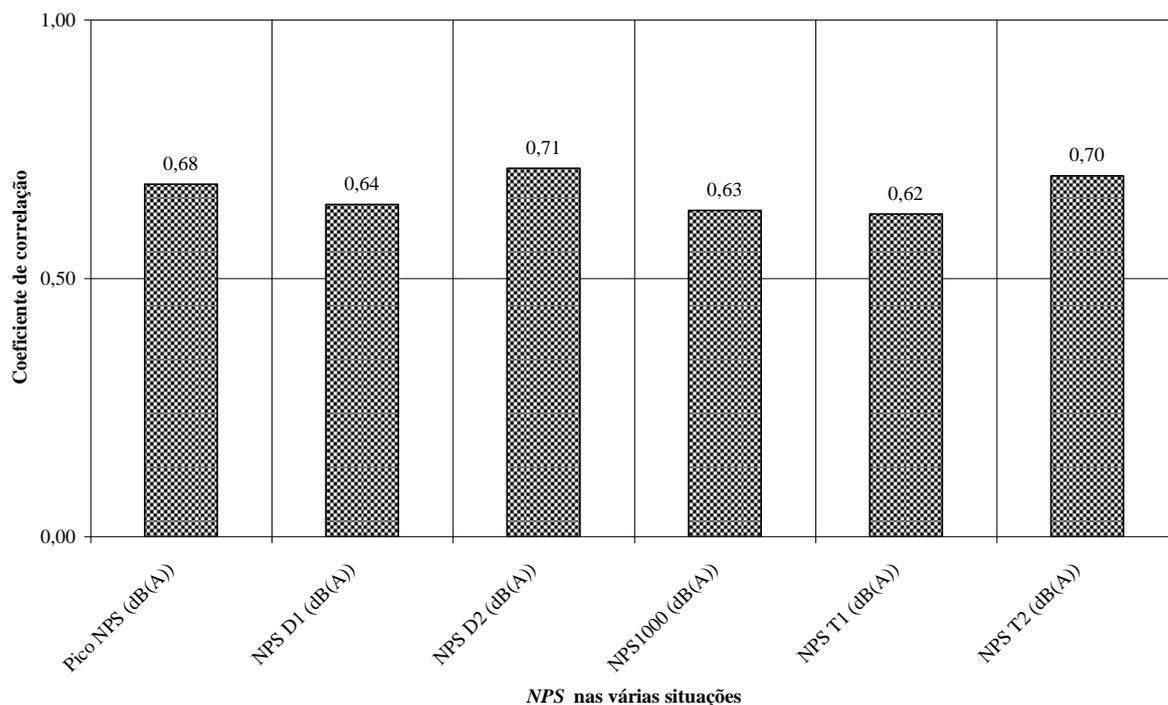


Figura 15 - Correlações entre NPS e velocidade

5.2 Modelo de previsão de NPS

Na bibliografia consultada não foram encontradas propostas de modelos matemáticos ou estatísticos de previsão de *NPS* semelhantes à apresentada neste trabalho. Este, apesar de ser passível a melhorias futuras, seja pela ampliação do banco de dados ou pelo emprego de outras metodologias, pode representar grande avanço na elaboração de projetos de pavimentação. Além de serem concebidos visando a segurança e a durabilidade das vias, também poderão prever a melhoria do conforto acústico da sociedade, fator ainda não priorizado pela engenharia rodoviária nacional.

5.2.1 Desenvolvimento do modelo

Para o desenvolvimento do modelo de previsão de *NPS* a partir das características do revestimento, foram utilizados os dados referentes a 5 trechos revestidos com misturas asfálticas CAUQ₁, CAUQ₃, AB, SBS₂ e PMF, selecionados aleatoriamente dentre os 9 estudados para

modelagem. Os demais trechos analisados foram utilizados nos procedimentos de validação.

O modelo estatístico foi desenvolvido para obtenção do *NPS* na frequência de 1.000 Hz, já que normalmente se faz o uso de decibelímetros para a avaliação de ruído de tráfego, e tais medidores fazem as leituras nesta frequência.

Perceber-se-á que o *VRD* não faz parte do modelo de previsão. Esta variável não representou benefícios ao modelo, não sendo significativa ($p\text{-level} \geq 0,05$) nas diversas simulações a partir da regressão linear múltipla, podendo ter um relacionamento não linear com o *NPS*, mas não avaliado neste trabalho. Sobretudo a correlação do *NPS* na frequência de 1.000 Hz (utilizado para a construção do modelo), com o *VRD* não foi significativa.

Eliminando-se os dados de elevado erro residual, foi elaborada a Equação (2) a partir da regressão linear múltipla.

$$NPS_{1000} = -81,6771 + 0,3103 \times V + 2,3518 \times IRI + 0,0673 \times \rho - 14,4742 \times MPD \quad (2)$$

em que:

NPS_{1000} = Nível de Pressão Sonora (NPS) em dB(A) a 1.000 Hz;

V = Velocidade em km/h;

IRI = Irregularidade Longitudinal;

ρ = Densidade em kg/m³;

MPD = Mean Profile Depth (mm).

Na Tabela 4 é apresentada a análise de consistência do modelo, no qual todos os coeficientes obtidos apresentaram $p\text{-level}$ inferiores ao

limite máximo de 5,0%. Isto significa que os erros causados pelos estimadores são devido ao

caso, e não aos fatores que estão sendo estudados.

Tabela 4 - Análise da consistência do modelo

Variável	b	St. Err. of b	B	St. Err. of B	t(10)	p-level
Interseção	-	-	-81,68	29,39	-2,78	0,0214
V	0,92	0,07	0,31	0,03	12,36	0,0000
IRI	1,30	0,19	2,35	0,35	6,81	0,0001
D	0,97	0,18	0,07	0,01	5,40	0,0004
MPD	-0,38	0,08	-14,47	3,20	-4,52	0,0015

A Figura 16 apresenta o diagrama de dispersão relacionando, através de uma reta simétrica

ca, os valores de *NPS* medidos em campo e os calculados com o modelo da Equação 2.

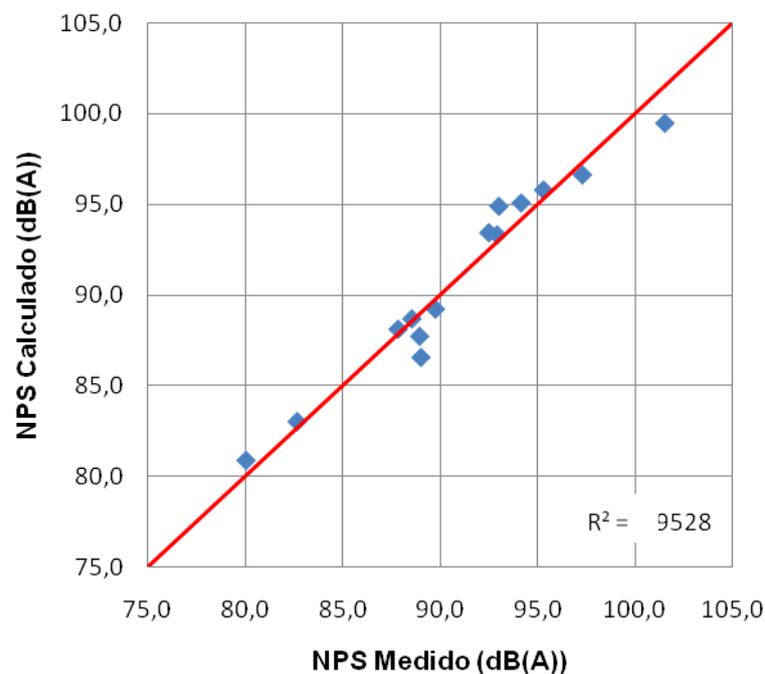


Figura 16 - Diagrama de Dispersão do *NPS*₁₀₀₀ (medido versus calculado)

Pode-se perceber que não houve superestimação nem subestimação significativa do modelo proposto, pois os valores se aproximaram bastante de uma reta a 45° de inclinação. Houve pouca dispersão dos valores calculados e medidos e o coeficiente de determinação (*R*²) obtido foi de 0,95.

Já a Figura 17 representa o gráfico de resíduos relacionando os valores medidos de *NPS*

com o erro residual na comparação com as estimativas. Quanto maior a distância do valor do resíduo do “zero”, maior é o erro residual. Obtiveram-se valores baixos para o erro residual, compreendidos no intervalo de -1,94 a 2,42 dB(A), o que corresponde a uma variação do valor calculado de no máximo 2,71% com relação ao valor medido em campo.

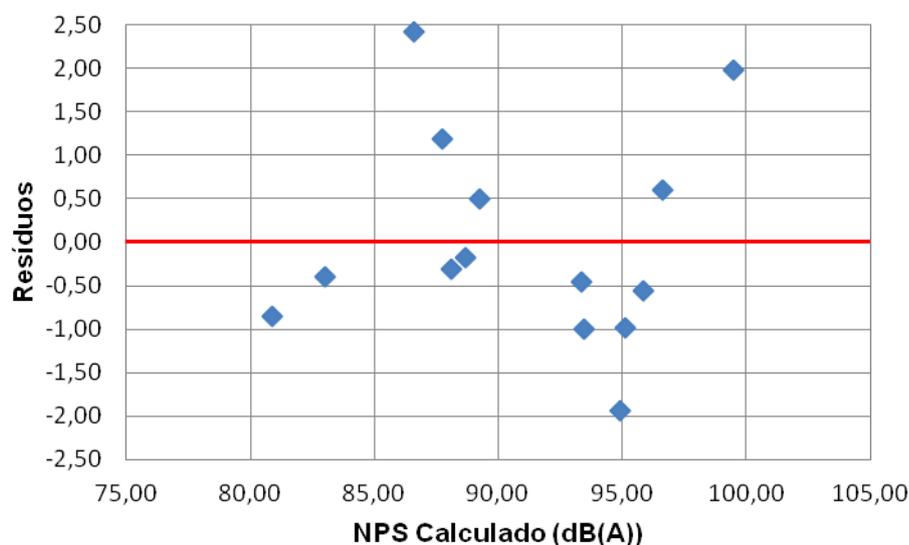


Figura 17 - Gráfico de Resíduos NPS_{1000} (Calculado versus Resíduos)

A REMQP (raiz do erro médio quadrático percentual) calculada para as diferenças individuais (resíduos) apresentadas foi de 1,30%, sendo esta inferior ao patamar de 15% adotado por Albuquerque (2007) como tolerável em obras de pavimentação.

5.2.2 Validação do modelo de previsão de NPS

Na Tabela 5 são apresentados os valores de NPS na frequência de 1.000 Hz medidos em

campo e calculados com o modelo proposto para os segmentos com revestimentos em misturas asfálticas CAUQ₂, MRA, TSD e SBS₁, selecionados para a validação do modelo.

A Figura 18 apresenta o diagrama de dispersão relacionando os valores medidos em campo e os calculados com uso do modelo acima apresentado (Eq. 2) para os segmentos de validação.

Tabela 5 - Teste de validação do modelo de previsão

Trecho/Revestimento	V (km/h)	IRI (m/km)	ρ (kg/m ³)	MPD (mm)	NPS_{1000} (dB(A)) Medido	NPS_{1000} (dB(A)) Calculado	Erro Residual
CAUQ ₂	40	1,46	2.403,45	0,75	93,75	85,07	8,68
	60	1,53	2.403,45	0,71	94,36	92,01	2,35
	80	1,62	2.403,45	0,75	104,09	97,85	6,24
MRA	40	3,23	2.272,29	1,12	86,19	75,05	11,14
	60	3,11	2.272,29	1,19	94,04	79,96	14,08
	80	3,03	2.272,29	1,22	99,78	85,54	14,24
TSD	40	3,05	2.264,15	1,89	82,61	62,93	19,68
	60	2,44	2.264,15	1,96	80,77	66,69	14,08
	80	2,68	2.264,15	2,00	80,46	72,88	7,58
SBS ₁	40	3,53	2.340,00	0,52	84,98	88,99	-4,01
	60	3,61	2.340,00	0,50	89,54	95,68	-6,14
	80	3,33	2.340,00	0,50	94,92	101,22	-6,30

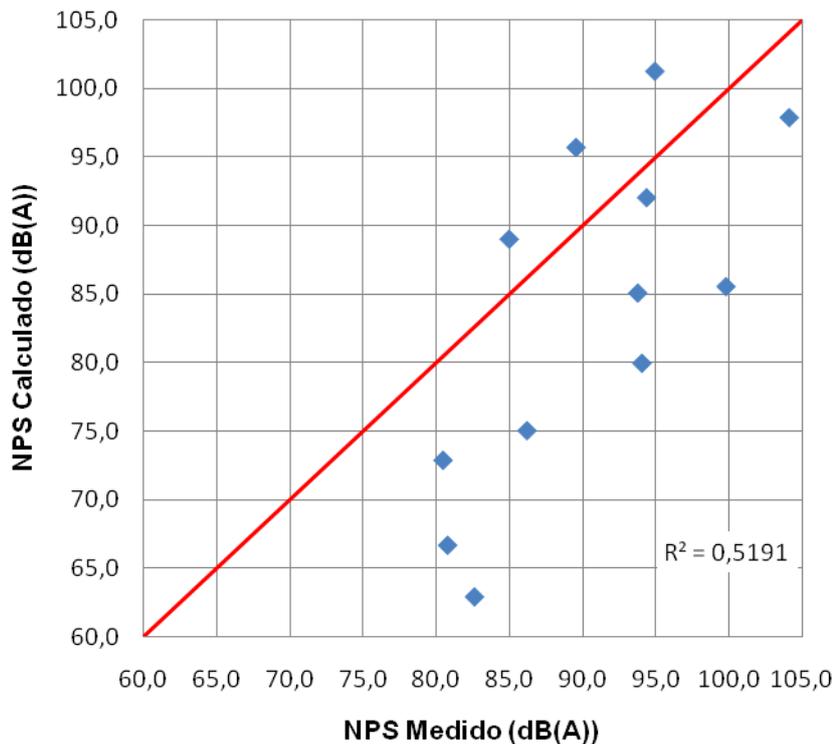


Figura 18 - Diagrama de Dispersão NPS_{1000} (medido versus calculado) – Validação

Utilizando-se os dados selecionados nos segmentos de validação, houve uma maior dispersão em relação às amostras utilizadas no desenvolvimento do modelo, e o coeficiente de determinação (R^2) obtido foi de 0,52.

A Figura 19 representa o gráfico de resíduos relacionando os valores medidos de NPS , dos segmentos de validação, com o erro residual na comparação com as estimativas.

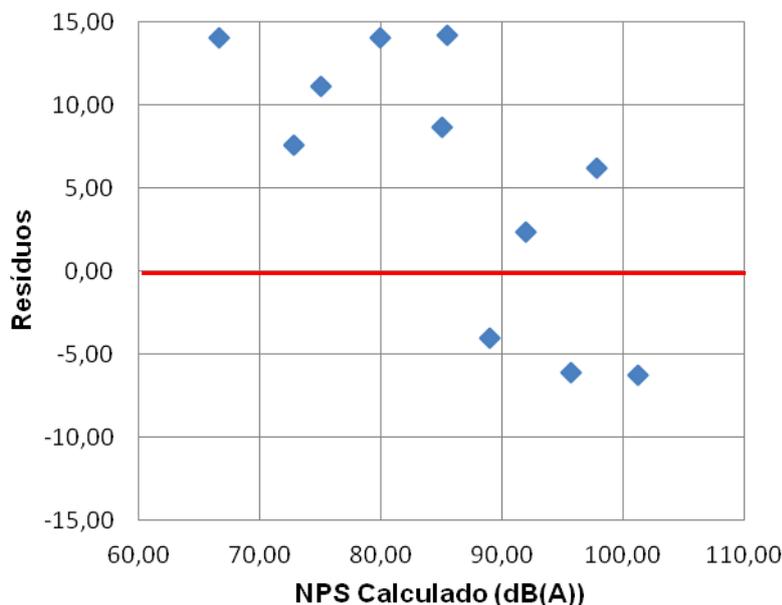


Figura 19 - Gráfico de Resíduos NPS_{1000} (Calculado versus Resíduos) – Validação

Calculando-se o REMQP para as diferenças individuais (resíduos) apresentadas, foi obtido o valor de 12,24%, sendo este inferior ao patamar tolerável adotado neste trabalho de 15,0%. Tendo em vista a grande dispersão e o elevado REMQP,

foi realizada a análise de variância (ANOVA: fator único) dos dados, para verificar se, estatisticamente, os valores medidos e os calculados fazem parte da mesma população (Tabela 7).

Tabela 7 - Análise de variância para valores medidos em campo e calculados pelo modelo

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	277,65	1	277,65	2,64	0,1186	4,3010
Dentro dos grupos	2.316,08	22	105,28	-	-	-
Total	2.593,72	23	-	-	-	-

A análise de variância demonstrou que não pode-se rejeitar a hipótese nula (H_0) de que as médias dos valores obtidos em campo e dos estimados pelo modelo proposto são iguais, já que o $F < F_{Crítico}$ e o $P_{value} > 0,05$ para o nível de significância de 5%.

Vale ressaltar que o modelo aqui proposto é válido para pavimentos revestidos com misturas asfálticas com agregados e ligantes semelhantes aos utilizados no estado de Sergipe e para velocidades de tráfego entre 40 e 80 km/h.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito um estudo dos mecanismos de geração de ruído de tráfego na interface pneu-pavimento, relacionando o índice de vazios, a textura superficial e a irregularidade longitudinal de vários pavimentos asfálticos com os respectivos *NPS* emitidos por um veículo de passeio trafegando em várias velocidades. De acordo com as análises dos dados obtidos nos levantamentos, ficou evidente que o *NPS* gerado na interface pneu-pavimento é diretamente proporcional ao aumento da velocidade (V).

Também, a partir das correlações lineares, conclui-se que a densidade (ρ – aqui representando indiretamente o índice de vazios) tem influência na emissão de ruído em baixas velocidades, quando o pneu tem maior contato com o pavimento, ou seja, aumentando-se o índice de vazios (menor densidade), menor será o ruído gerado. A macrotextura (medida em *MPD*) influencia na redução do *NPS*, especialmente em altas velocidades, onde uma textura mais grosseira propicia uma maior dissipação do ar na interface pneu-pavimento. A irregularidade longitudinal (*IRI*) influencia no aumento do *NPS*, de forma menos significativa se comparada às variáveis anteriores. Tal fator acresce os impactos entre o pneu e o pavimento e, conseqüentemente, eleva o *NPS*, uma vez que há um aumento das vibrações mecânicas. Já a microtextura (*VRD*) não apresentou influência significativa nos valores de *NPS*.

Utilizando-se regressão linear múltipla na análise estatística dos dados, foi proposto um modelo estatístico que permite a previsão do *NPS*

gerado na interface pneu-pavimento, a partir dos valores de velocidade de tráfego, irregularidade longitudinal, densidade do revestimento e macrotextura (em termos de *MPD*).

A determinação do *NPS* foi mais influenciada neste modelo pela variação da velocidade de tráfego (V), seguido pela densidade do revestimento asfáltico (D). A macrotextura (*MPD*) e a irregularidade longitudinal (*IRI*) geraram menor variação ao valor de *NPS*.

O modelo desenvolvido apresentou boa confiabilidade de resultados, permitindo seu uso na elaboração de projetos, nos quais poderão prever também o *NPS* proveniente da interface pneu-pavimento. O modelo proposto tem aplicação restrita às mesmas condições de clima e de materiais para os quais os dados utilizados foram obtidos. A ampliação do banco de dados e a utilização de métodos matemáticos e estatísticos mais sofisticados poderão, no futuro, aprimorar o modelo, ampliando sua aplicação a outros tipos de pavimentos, diferentes climas e materiais constituintes.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pelo apoio financeiro a realização desta pesquisa, a partir de projeto contemplado no Edital MCT/CNPq Nº 18/2009 – Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação em Transportes.

REFERÊNCIAS

- Albuquerque, F. S. (2007) *Sistema de Gerência de Pavimentos para Departamentos Estradas do Nordeste Brasileiro*. 303p. Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Albuquerque, F. S.; Núñez, W. P. (2011) Development of Roughness Prediction Models for Low-Volume Road Networks in Northeast Brazil. *Transportation Research Record*, v. 2205, p. 198-205. DOI: [10.3141/2205-25](https://doi.org/10.3141/2205-25).
- Almeida, E. R., Campos, A. C.; Miniti, A. (1982) Estudo audiométrico em operários da seção de "teste de motores" de uma indústria automobilística. *Revista Brasileira de Otorrinolaringologia*, 48: p.16-28.
- Almeida, H. S.; Toledo, J. C. (1989) Método Taguchi: Qualidade voltada para o projeto do produto e do processo. *Revista de Administração*. 24 (4): p.62-68.

- ABNT (2000a) *NBR 10151: Avaliação de ruído em áreas habitadas visando o conforto da comunidade*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ABNT (2000b) *NBR 10152: Níveis de ruído para conforto acústico*. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- ASTM (2003) *ASTM E-303-93: Standard Method for Measuring Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*. American Society for Testing and Materials. Annual book of ASTM Standards, Road and Paving Materials; Vehicle Pavement Systems, Volume 04.03, USA, 5 p.
- ASTM (2006) *ASTM-E-965: Test for Measuring Surface Macrotexture Depth Using a Sand Volumetric Technique*. American Society for Testing and Materials. Annual Book of ASTM Standards American Society for Testing and Materials, vol. 04.03, USA.
- Bernhard, R.; Wayson, R. L. (2004) *An introduction to tire/pavement noise of asphalt pavement*. International Transport Research Documentation (ITRD) Database. Transportation Research Board, Washington D.C.
- Bernucci, L. B.; Motta, L.M.G.Da; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. (2006) *Pavimentação Asfáltica- Formação Básica para Engenheiros*. 2. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS & ABEDA.
- CONAMA (1990). *Resolução 001, de 08 de março de 1990: "Dispõe sobre critérios e padrões da emissão de ruídos das atividades industriais, comerciais, sociais ou recreativas, inclusive as de propaganda política"*. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF.
- Concha-Barrientos, M.; Campbell-Lendrum, D.; Steenland, K. (2004) *Occupational noise: assessing the burden of disease from work-related hearing impairment at national and local levels*. WHO Environmental Burden of Disease Series, Nº 9. Geneva, World Health Organization.
- Dias, M. R. (2005) *Utilização de mistura asfáltica com borracha pelo processo da via-seca execução de um trecho experimental urbano em Porto Alegre – RS*. 2005. 135p. Dissertação de mestrado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre.
- FHWA (1998) *FHWA Traffic Noise Model*. Federal Highway Administration. (FHWA TNM®) Technical Manual. U.S. Department of Transportation.
- FHWA (2000) *Highway traffic noise in the United States – Problem and Response*. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.
- Freitas, E. (2008) *Contribuição da Superfície dos Pavimentos para a Produção de Ruído*. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. Guimarães, Portugal.
- Gerges, S. N. Y. (2000) *Ruído: fundamentos e controle*. Florianópolis: NR Editora.
- Hanson, D. I., James, R. S. (2004a) *Colorado Dot Tire Pavement Study*. Auburn University, Auburn, Alabama.
- Hanson, D. I.; James, S. J.; Nesmith, C. (2004b) *Tire/pavement noise study*. Auburn: NCAT - National Center for Asphalt Technology.
- Hanson, D. I.; Donavon, P.; James, R. (2005) Tire/pavement noise characteristics for HMA pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, v.74, p.1-38.
- ISO (1997) *ISO 11819: Acoustics – measurement of the influence of road surface on traffic noise. Parte 1*. International Organization for Standards (ISO). Genebra. 31p.
- ISO (2000) *ISO/CD 11819-2: "Acoustics -Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise -- Part 2: The Close Proximity Method"*. International Organization for Standards (ISO). Geneva, Switzerland.
- Irwin, J. D. (1979) *Industrial Noise and Vibration Control*. Prentice Hall.
- Nepomuceno, L. X. (1977) *Acústica*. São Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda.
- Paterson, W. D. O. (1987) *Road deterioration and maintenance effects*. World Bank Publications, Washington-DC, USA. Disponível na Web em: <http://www.worldbank.org>. Consultado em Maio de 2013.
- Raitanen, N. (2005) *Measuring of Noise and Wearing of Quiet Surfaces*. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Finland.
- Rasmussen, R. O.; Bernhard, R. J.; Sandberg, U.; Mun, E. P. (2007) *The Little Book of Quieter Pavements*. Federal Highway Administration Office of Pavement Technology, HIPT-11200 New Jersey Avenue, SE Washington, DC 20590. July.
- Salgado, M.; Kohler, E. Y Achurra, S. (2009) *Técnicas e Índices para Evaluación de Macrotextura en Pavimentos. XVII Simposio Colombiano Sobre Ingeniería de Pavimentos*, Medellin, Colombia August.
- Sandberg, U. (1987) Road traffic noise: the influence of the road surface and its characterization. *Applied Acoustics*, vol. 21, pp. 97-118, 1987. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X\(87\)90004-1](http://dx.doi.org/10.1016/0003-682X(87)90004-1).
- Sandberg, U.; Ejsmont, J. (2002) *Tyre/Road Noise Reference Book*. INFORMEX Ejsmont Sandberg Handelsbolag, Kisa, Sweden.
- Santos, A. P. da S. (2007) *Estudo da eficácia do ruído de tráfego em pavimentos drenantes*. 2007. 224 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Rodoviária), Universidade de Minho.
- Specht, L. P.; Kohler, R.; Pozzobon, C. E.; Callai, S. C. (2009) Causas, formas de medição e métodos para mitigação do ruído decorrente do tráfego de veículos. *Revista Tecnologia da Universidade de Fortaleza*, v.30, n.1, p.12-26.