

AVALIAÇÃO E MODELAÇÃO DO RUÍDO DE CONTATO PNEU-PAVIMENTO

Elisabete F. Freitas¹, Pedro C. Machado¹, Carina P. Freitas¹

¹Universidade do Minho

efreitas@civil.uminho.pt, b5060@civil.uminho.pt, carinapf@gmail.com

Resumo

As políticas de controlo do ruído atuais contemplam a redução do ruído na fonte. No caso do ruído rodoviário essas políticas obrigam à avaliação da qualidade dos pavimentos no que respeita ao ruído de contato pneu-pavimento e à sua previsão, tal como acontece com outros parâmetros. Este trabalho baseia-se na aplicação do método da proximidade imediata (CPX) em camadas superficiais de diversas tipologias da rede rodoviária para a avaliação do ruído pneu-pavimento e nos ensaios complementares de absorção sonora, de amortecimento de vibrações e de textura superficial. Com estes dados fez-se uma abordagem inovadora à modelação do ruído pneu-pavimento com a utilização de técnicas *Data Mining*. Os principais resultados foram a avaliação da contribuição de cada tipo de superfície para o ruído rodoviário e a análise da importância relativa das variáveis consideradas no modelo, tendo-se verificado que a velocidade é preponderante no modelo e que o amortecimento tem uma importância muito superior à das restantes variáveis que estão relacionadas com a textura.

Palavras-chave: ruído pneu-pavimento, CPX, absorção, amortecimento, *data mining*.

Abstract

Modern noise control policies acknowledge noise abatement at source. As far as traffic noise is concerned, those policies involve the assessment of pavement quality respecting to tyre-road noise and its prevision, like any other pavement performance parameter. This work relies on the Close Proximity method (CPX) to assess tyre-road noise and on complementary tests such as noise absorption, damping and surface texture. Those tests were carried out on several types of pavement surfaces of the national road network. A new approach to tyre-road noise modelling was made with the data through Data Mining techniques. The main results were the assessment of the contribution of each type of surface to traffic noise and the analysis of the relative importance of each variable integrated in the model. It was found that speed is preponderant and damping is significantly more important than the other variables related to texture.

Keywords: tyre-road noise, CPX, absorption, damping, data mining.

PACS no. 43.50.Lj

1 Introdução

As políticas de controlo do ruído implementadas a partir dos anos 80 levaram as administrações rodoviárias e os construtores a aplicarem medidas de mitigação do ruído. Porém, apenas recentemente essas políticas contemplam a redução do ruído na fonte, o que obriga à avaliação da qualidade dos pavimentos no que respeita ao ruído, tal como acontece com outros parâmetros, e também ao desenvolvimento de superfícies de baixo ruído.

Atualmente já existe um conjunto de métodos que permite avaliar o ruído de contato pneu-pavimento, sendo o método da proximidade imediata (CPX) o mais interessante do ponto de vista da gestão da qualidade da rede rodoviária por se realizar à velocidade de circulação do tráfego.

No processo de desenvolvimento de uma camada de baixo ruído há um conjunto de aspetos que devem ser considerados, como por exemplo a dimensão dos agregados, a porosidade e o tipo de textura, que de certa forma garantem que o produto final terá um determinado desempenho acústico.

Os modelos de previsão do ruído pneu-pavimento são uma ferramenta que, aplicada na fase de concepção e de formulação das misturas, indica o desempenho da mistura em função das suas características e nalguns casos em função das características dos pneus. Este tipo de modelos é, por esta razão, uma ferramenta muito útil. Contudo, alguns são extramente complexos e outros, por serem simplificados, têm pouca fiabilidade.

Atualmente existem técnicas, como é o caso das técnicas Data Mining (DT), que permitem extrair modelos de dados com relações complexas e que proporcionam bons resultados.

Esta técnica foi utilizada neste estudo para modelar o ruído de contacto pneu-pavimento obtido pelo método CPX a diversas velocidades, em diferentes condições climatéricas e em função de características das camadas tais como, espectro de textura, absorção e amortecimento.

O principal objectivo do desenvolvimento deste modelo é prever o nível de ruído de novas soluções de camadas de desgaste quando estas se encontram em fase de estudo laboratorial.

A seguir aborda-se brevemente os métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento e os modelos de previsão existentes. Posteriormente é definida a metodologia de modelação adotada, os dados seleccionados para o modelo são apresentados e discutidos e são apresentadas as principais conclusões.

2 Avaliação do ruído pneu-pavimento

Para a avaliação do ruído de contacto pneu-pavimento foram propostos diversos métodos. Entre os métodos mais utilizados destacam-se os seguintes:

- Método da proximidade imediata (Close ProXimity method, CPX) [1];
- Método estatístico de passagem (Statistical Pass-By method, SPB) [2];
- Método de passagem controlada (Controlled Pass-By method, CPB).

Como o ruído pneu-pavimento é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelo comportamento dos condutores (através do controlo da velocidade e da pressão dos pneus), pelas características dos pneus (estrutura, dimensão, rigidez da borracha, relevo, desgaste e idade), pelas características da superfície do pavimento (macro e megatextura, irregularidade, porosidade, rigidez, idade, desgaste e presença de água) e pelo clima (temperatura e vento) deve complementar-se a avaliação do ruído com outros ensaios de caracterização da superfície como é o caso da textura, da absorção sonora e da rigidez da camada superficial, determinada a partir da impedância mecânica.

3 Modelação do ruído pneu-pavimento

Um modelo de previsão do ruído de contacto pneu-pavimento deve integrar parâmetros da superfície do pavimento e do pneu. Os mecanismos de interação são complexos o que torna o uso de expressões matemáticas extremamente complicado. Por isso existem modelos que permitem prever o ruído simulando apenas alguns dos seus mecanismos e outros que simulam todos os mecanismos. Estes modelos podem ser classificados em modelos empíricos simples, modelos semi-empíricos e teóricos e modelos completos [3].

Os modelos empíricos simples simulam o impacto dos blocos do piso do pneu na superfície do pavimento ou simulam o ruído em função das características do pavimento ou ambas as coisas. Os modelos semi-empíricos e teóricos já permitem prever o ruído considerando o bombeamento de ar e a vibração da carcaça do pneu. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo de Kropp que foi melhorado por Larsson [4]. Outro modelo de referência é o modelo TINO por considerar condições de operação dos veículos realistas [3]. Os modelos completos como é o caso do modelo TRIAS baseiam-se nas características dos pneus, como o tamanho, o material e o relevo do piso, e da superfície do pavimento, como o tamanho do agregado, percentagem de betume, densidade e tipo de camada. Esta informação é usada em submodelos para simular a superfície do pavimento e todos os mecanismos de geração e propagação de ruído. Outro exemplo de modelo completo é o modelo DEUFRAKO, desenvolvido em conjunto pela França e pela Alemanha, que se baseou no modelo SPERoN (Statistical Physical Explanation of Rolling Noise model). Este modelo considera ainda as características visco-elásticas dos pneus e um módulo de previsão da propagação do ruído junto às fachadas dos edifícios. Possui a característica particular de ter sido adaptado para ser usado como uma ferramenta de dimensionamento [5].

4 Metodologia do estudo

4.1 Seleção das secções de estudo

Neste estudo foram consideradas 9 secções com 200 m de extensão (Tabela 1). O que constitui uma parte das secções estudadas no âmbito do projeto NOISELESS - *Percepção, modelação e redução do ruído através de superfícies de pavimentos inovadoras e duráveis*.

Tabela 1 – Descrição e designação das camadas superficiais das secções de estudo.

Descrição do material	Designação da camada
Microbetão Betuminoso (MBR7)	S1
Mistura Betuminosa Aberta com Borracha (média % de borracha) (MBA BMBm)	S2
Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com Borracha (MBA BMB12)	S3
Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com Borracha (MBA BMB10)	S4
Betão Betuminoso Denso (BD16)	S5
Betão Betuminoso Denso (BD16)	S6
Microaglomerado (McB)	S7
Betão Betuminoso Rugoso (BBR12)	S12
Microaglomerado (McB)	S13

4.2 Definição das variáveis do modelo

A variável que se pretende modelar, variável dependente, é o nível de ruído medido junto ao pneu pelo método CPX. Este método possibilita a medição dum nível equivalente de ruído numa base espacial em vez de temporal, como é habitual fazer-se na avaliação da qualidade funcional dos pavimentos a nível da rede. Por conseguinte, neste estudo considerou-se o nível de ruído equivalente para um comprimento base de 10 m.

Quanto às variáveis dependentes, são relativas às condições de circulação dos veículos (velocidade), às condições climáticas (temperatura do ar), ao pneu utilizado no ensaio (Avon AV4) e às características das superfícies (textura, absorção, amortecimento). Estas variáveis foram obtidas através dos seguintes ensaios:

- Ruído pneu-pavimento, medido pelo método CPX em trechos de 10 m;
- Textura superficial, obtida através de um perfilómetro de alta velocidade em trechos de 10 m;
- Absorção sonora, medida a cada 10 m, através de um tubo de impedância adaptado para medições sobre pavimentos rodoviários,
- Amortecimento, medido a cada 10 m.

Os equipamentos utilizados em cada um dos ensaios foram os apresentados na Figura 1. A seguir são feitas algumas considerações quanto à realização de cada um dos ensaios e à seleção das variáveis.

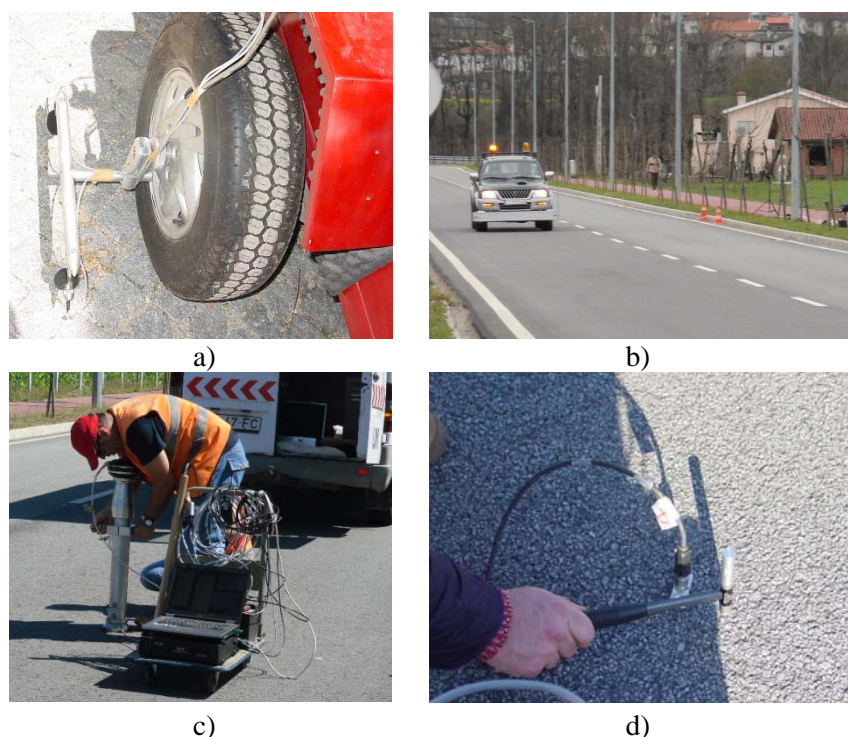


Figura 1 – Detalhes dos ensaios de avaliação do desempenho: a) configuração de montagem dos microfones em atrelado; b) ensaio pelo método CPB; c) ensaio de absorção em campo; d) ensaio de impedância mecânica.

4.2.1 Ruído pneu-pavimento

Para a medição do ruído contacto pneu-pavimento foi utilizado o método CPX. Os microfones foram instalados num atrelado (Figura 1a)), o que minimiza a interferência do ruído do motor nas medições

efetuadas. O pneu de ensaio é o AVON V4 de acordo com o recomendado [6]. Os ensaios foram realizados a velocidades compreendidas entre 30 km/h e 100 km/h. O nível de ruído equivalente foi registado a cada 10 m. A temperatura do ar e da superfície foram registadas, mas não foram utilizadas para correção dos níveis de ruído por ainda não terem sido validadas as expressões de correção para o nosso país. Neste estudo a temperatura foi considerada uma variável do modelo.

4.2.2 Textura

As gamas da textura que mais influenciam o ruído são a macro e a megatextura. Para a sua determinação utilizou-se um perfilómetro (Figura 1b)) para obter o perfil do pavimento em cada secção. Os dados do perfilómetro foram posteriormente introduzidos num programa desenvolvido na plataforma MATLAB ® que devolve o nível de textura em função da frequência espacial, a cada 10 m. O espectro assim determinado foi dividido em 4 trechos, definidos por 8 variáveis, de acordo com o apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Variáveis do espectro de textura selecionadas.

Trechos	Frequências espaciais selecionadas (c/m)	Comprimento de onda da textura (mm)	Variável
1	2.5 e 4	400 e 250	T400, T250
2	5, 16 e 25	200, 63 e 40	T200, T63, T40
3	31.5 e 80	31.5 e 12.5	Tmean (média)
4	100 e 315	10 e 3.15	T10, T3.15

Para além destas variáveis, foram ainda consideradas as variáveis de caracterização da megatextura definidas no projeto de norma ISO/FDIS 13473-5 [7].

- Ltx63 – nível de textura em bandas de oitava com centro a 63 mm;
- Ltx500 – nível de textura em bandas de oitava com centro a 500 mm;
- Lme – nível de textura na gama completa da megatextura (entre 63 mm e 500 mm).

Considerou-se ainda a profundidade média do Perfil (MPD) obtida de acordo com a norma EN ISO 13473-1 [8], por ser um parâmetro obtido de forma corrente.

4.2.3 Absorção

Para a medição de absorção foi utilizado um tubo de impedância auto-fabricado com 80 mm de diâmetro e dois microfones [9]. Este tubo tem uma extremidade aberta, que é colocada sobre a superfície a ser observada (Figura 1c)). O coeficiente de absorção foi calculado como uma função da impedância acústica ao longo de um intervalo de frequências de 250 Hz a 2,5 kHz (1/3 de oitava).

A frequência onde ocorre o pico de absorção máxima depende da espessura e da porosidade da camada. Em camadas fechadas esse pico ocorre a frequências superiores a 2000 Hz [10], isto é, em frequências que interferem pouco com a audição humana. Como a localização do pico de absorção é muito variável, caso ocorra dentro dos limites do ensaio, para o parâmetro absorção considerou-se a média dos valores medidos em bandas de 1/3 de oitava entre as frequências de 250 Hz e 2,5 kHz.

4.2.4 Amortecimento

O amortecimento é uma medida de dissipação de energia de uma estrutura. Este pode ser obtido a partir da função de resposta em frequência (FRF), que é a razão entre uma determinada resposta (saída) medida num ponto i e a excitação (entrada) provocada no ponto j da estrutura, medidas em

simultâneo, pelo Método de Largura de Banda (MLB). O MLB pode ser utilizado para estimar as razões de amortecimento modal, num sistema com múltiplos graus de liberdade e com frequências de ressonância bem espaçadas, assumindo que em cada banda de ressonância a resposta é dominada pelo respectivo modo e que a contribuição dos outros modos é irrelevante [11].

Os valores das frequências de ressonância, do amortecimento e a respectiva coerência nas análises (indicador da qualidade da medição) foram obtidos dos espectros de impedância mecânica (FRF), utilizando para o efeito um martelo instrumentado e um acelerômetro (Figura 1d)). Cada espectro de impedância resultou da média linear de 3 medidas efetuadas no mesmo local da amostra, sendo posteriormente selecionados somente os espectros de impedância com um factor de coerência superior a 95%.

Para cada superfície ensaiada foram determinados os valores médios de amortecimento em cada banda de 1/3 de oitava e definidas as curvas de regressão que permitem estimar o amortecimento entre 500 Hz e 3500 Hz.

Para integração no modelo foram selecionadas as frequências de 800 Hz e 2000 Hz, por se verificar que o comportamento a baixas e altas frequências é diferente e por serem os únicos valores que caracterizam algumas secções, como é o caso da S4. Na Tabela3 apresenta-se os valores utilizados no modelo.

Tabela 3 – Amortecimento calculado a partir das curvas de regressão para as frequências de 800 Hz e 2000 Hz.

Frequência de ressonância	S1 (MBR7)	S2 (MBA BMBm)	S3 (MBA BMB12)	S4 (MBA BMB10)	S5 (BD16)
800 Hz	16.41	17.30	12.39	17.50	16.11
2000 Hz	6.80	8.80	2.07	4.80	6.27

Frequência de ressonância	S6 (BD16)	S7 (McB)	S12 (BBR12)	S13 (McB)
800 Hz	14.69	19.30	18.22	17.41
2000 Hz	7.48	5.77	4.30	8.05

4.3 Modelação do ruído

Para a modelação do ruído pneu-pavimento foi usado o programa R [12], de utilização livre, que integra o pacote RMiner. Este pacote é um programa específico que permite aplicar vários algoritmos e avaliar o seu comportamento com um conjunto diferente de métricas [13]. Os algoritmos de DM utilizados neste estudo foram:

- MR (*multiple regression*);
- MLPE (*multilayer perceptron ensemble*);
- SVM (*support vector machine*).

O algoritmo MR é semelhante à regressão simples. A regressão simples envolve uma variável independente enquanto o Mr envolve várias variáveis independentes e estabelece uma relação entre elas e a variável dependente.

O algoritmo MLPE utiliza uma arquitetura muito próxima da estrutura do cérebro humano e é composto por unidades de processamento simples, denominados nódulos ou neurónios artificiais, com um grande número de interligações. É utilizado para regressão e classificação.

O SVM foram originalmente usados em problemas de classificação. A ideia básica foi separar duas classes de objetos utilizando um conjunto de funções. Nos métodos de classificação e de regressão existe uma função de erro para minimizar, submetida a algumas restrições. Neste caso foram testados dois parâmetros de busca (*heuristic10* e *uniform design* (UD)).

Avaliação da qualidade do ajuste dos modelos foi feita através dos parâmetros erro absoluto médio (MAE – *Mean Absolute Error*) e coeficiente de determinação (R^2).

5 Resultados

5.1 Ruído pneu-pavimento

Na Figura 2 apresenta-se os níveis de ruído medidos de acordo com o método CPX para velocidades entre os 40 km/h e os 80 km/h. Estes valores correspondem à média dos níveis de ruído medidos por trechos de 10 m ao longo de cada secção de 200 m. Devido a questões de segurança em alguns locais não foi possível atingir-se a velocidade de 90 km/h.

Nas secções observadas, os níveis de ruído obtidos têm diferenças de cerca de 1.5 dB(A) a 50 km/h e de 3.3 dB(A) a 80 km/h.

Importa notar que o pneu utilizado representa melhor o ruído pneu-pavimento dos veículos pesados o que justifica a aparente diferença reduzida a velocidades mais baixas.

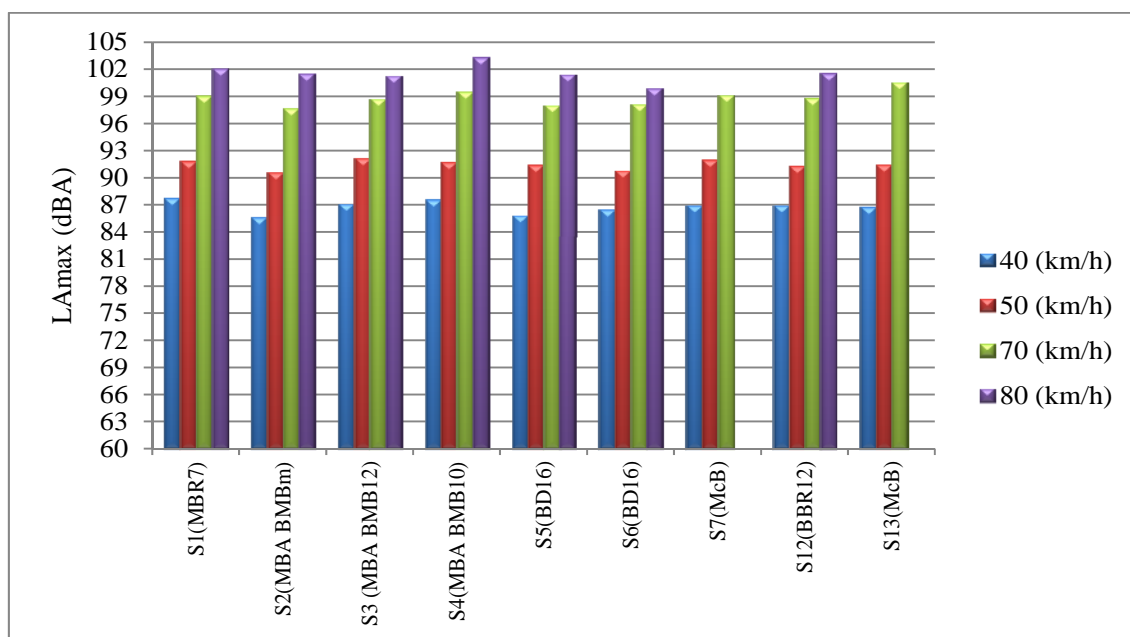


Figura 2 – Níveis de ruído correspondentes à média dos valores medidos a cada 10 m pelo método CPX.

5.2 Modelo

A base de dados utilizada para a modelação contém 1148 observações das 17 variáveis independentes atrás referidas. Na Tabela 3 apresenta-se os valores dos parâmetros de qualidade do ajuste para os quatro modelos selecionados. O modelo MLPE, que recorre a redes neuronais para estabelecer relações entre as variáveis tem o melhor ajuste, uma vez que tem o menor erro absoluto médio (MAE) e explica 96% da variabilidade encontrada. O modelo que apresentou pior desempenho foi o de regressão múltipla (MR) que, ainda assim, consegue explicar 93% da variabilidade.

Tabela 3 – Erro absoluto médio e coeficiente de determinação para os modelos testados.

Modelo	Técnica	MAE	R ²
MR	-	1.60	0.93
MLPE	Heuristic10	1.25	0.96
SVM	Heuristic10	1.33	0.95
SVM UD	UD	1.30	0.95

A importância relativa, expressa em termos percentuais, de cada variável em cada um dos modelos é mostrada da Figura 3. A velocidade é a que tem sempre maior importância, aproximando-se dos 45%. Seguem-se as variáveis relativas ao amortecimento, com uma importância próxima dos 10% e da textura Tmean (média das frequências compreendidas entre 31.5-12.5 Hz). As restantes têm importâncias inferiores a 5%.

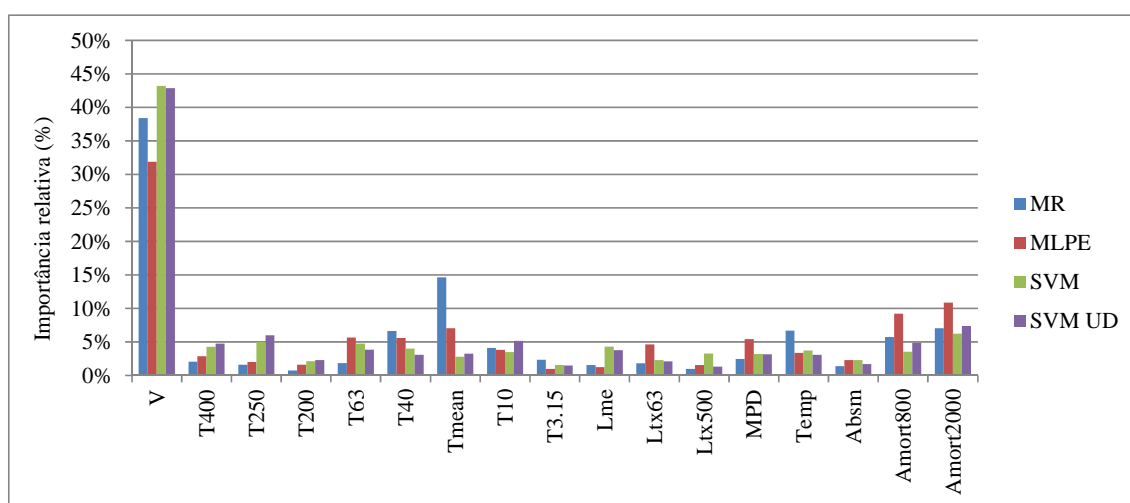


Figura 3 – Importância relativa de cada variável em cada modelo testado.

6 Conclusões

O ruído de contacto pneu-pavimento é considerado atualmente um parâmetro funcional de caracterização dos pavimentos rodoviários. Como para qualquer outro parâmetro de estado, interessa na fase de concepção da camada superficial prever o nível de ruído que esta irá proporcionar ao longo do tempo. Além disso, importa integrá-lo nos sistemas de gestão de pavimentos, quer para se conhecer o estado atual deste parâmetro quer para a sua previsão ao longo do tempo. Este trabalho é um primeiro passo neste sentido.

O método de avaliação do ruído escolhido foi o método CPX porque se coaduna com as práticas generalizadas de avaliação da qualidade dos pavimentos, isto é, por ser um método de medição em contínuo que se integra na corrente de tráfego. Este método permite tratar os valores medidos em termos espaciais, possibilitando a comparação dos resultados com outros parâmetros, como por exemplo a textura.

No processo de modelação foram consideradas 17 variáveis e testados 4 modelos. Essas variáveis caracterizam a textura, a absorção sonora e o amortecimento das camadas superficiais dos pavimentos

e ainda a temperatura. A variável dependente integra intrinsecamente as características do veículo de ensaio.

Verificou-se que o modelo MLPE (*multilayer perceptron ensemble*) que utiliza redes neuronais é o que se ajusta melhor aos dados.

A análise da importância relativa das variáveis mostrou que a velocidade é preponderante no modelo e que o amortecimento (indicador da capacidade de uma estrutura dissipar energia) tem uma importância muito superior à das restantes variáveis.

A megatextura tem uma contribuição considerável enquanto a absorção tem um peso reduzido que se deve provavelmente ao facto de todas as camadas serem de baixa porosidade.

O passo que se segue é a validação do modelo para condições de laboratório. Esta validação pode ser feita comparando os resultados obtidos em amostras produzidas em laboratório e em amostras obtidas em campo.

Agradecimentos

Ao Professor José Dias Rodrigues da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pelo seu apoio na definição da metodologia de determinação do amortecimento das camadas dos pavimentos.

Ao Professor Paulo Cortez da Universidade do Minho, Departamento de Produção e Sistemas, pelo seu apoio no desenvolvimento do modelo.

Este estudo foi financiado no âmbito do Programa Operacional Temático Factores de Competitividade (COMPETE) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER, através dos projetos FCOMP-01-0124-FEDER-007560 e PEst-OE/ECI/UI4047/2011.

Referências

- [1] ISO 11819-1: 1997. Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: statistical pass-by method.
- [2] ISO CD 11819-2: 2000. Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: The Close Proximity Method.
- [3] Sandberg, U.; Ejsmont J. *Tire / Road Noise Reference Book*, Informex SE – 59040, Kisa, Sweden (www.informex.info), 2002.
- [4] Larsson, K. *Modelling of dynamic contact – exemplified on the tyre-road interaction*. PhD Thesis, Department of applied acoustics, Calmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2002.
- [5] DEUFRAKO. *Prediction and Propagation of Rolling Noise*. Final Report, 2009.
- [6] Morgan, P.; Sandberg, U.; Blokland, G. The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3. *38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2009*, Ottawa, 2009.
- [7] ISO/FDIS 13473-5:2008. Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 5: Determination of megatexture.
- [8] EN ISO 13473-1:1997. Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of Mean Profile Depth.
- [9] Freitas, E.; Raimundo, I.; Inácio, O; Pereira, P. In situ assessment of the normal incidence sound absorption coefficient of asphalt mixtures with a new impedance tube. *39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2010*, Lisbon, 2010.

- [10] Raimundo, I.; Freitas, E.; Inácio, O; Pereira, P. Sound absorption coefficient of wet gap graded asphalt mixtures. *39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2010*, Lisbon, 2010.
- [11] Ewins. *Modal Testing: Theory, Praticce and Application*, Research Studies Press Ltd., UK, 2000.
- [12] R Development Core Team: *A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2010. <http://www.R-project.org>.
- [13] Cortez, P. Data mining with neural networks and support vector machines using the R/rminer tool. In: Perner P (ed), *Advances in data mining. Applications and theoretical aspects. Proceedings of 10th industrial conference on data mining, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, 2010, pp 572–583.