

AVALIAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO RODOVIÁRIO EM PAVIMENTOS COM CAMADAS DE DESGASTE DELGADAS

Elisabete Freitas
Universidade Minho
Guimarães, Portugal
efreitas@civil.uminho.pt

Paulo Pereira
Universidade Minho
Guimarães, Portugal
ppereira@civil.uminho.pt

Joel Paulo
Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
Lisboa, Portugal
jpaulo@deetc.isel.ipl.pt

José Bento Coelho
Instituto Superior Técnico de Lisboa
Lisboa, Portugal
bcoelho@ist.utl.pt

RESUMO

O ruído produzido pelo tráfego rodoviário, sendo uma componente importante de poluição ambiental que afecta significativamente as populações, foi incluído no conjunto de indicadores de desempenho dos pavimentos. No entanto, a informação existente quanto ao impacte ambiental dos diferentes tipos de camadas de desgaste utilizadas correntemente em Portugal é escassa, de modo a não ser possível fazerem-se considerações ao nível da gestão dos pavimentos, particularmente no que respeita às estratégias de reabilitação. Neste artigo faz-se a comparação do nível de ruído (L_{max}) em diversos pavimentos com camadas de desgaste delgadas adoptadas actualmente na reabilitação funcional de pavimentos. O nível de ruído dos veículos ligeiros é obtido pelos métodos da passagem controlada (CPB) e da proximidade imediata (CPX). A metodologia utilizada foi a preconizada nas normas ISO 11819-1:1997 e ISO CD 11819-2. Em ambos os métodos, as camadas delgadas apresentam níveis de ruído reduzidos relativamente às camadas convencionais.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, devido à necessidade de conservação e reabilitação dos pavimentos, a construção de camadas superficiais de espessura reduzida (delgadas) tem aumentado de forma considerável. Este tipo de camadas reúne um conjunto de características que proporcionam atrito e drenagem superficial da água das chuvas adequados e adicionalmente intervêm positivamente na redução do ruído de contacto pneu-pavimento. Em alguns países do norte da Europa, como por exemplo a Holanda e a França, as misturas delgadas são utilizadas há muitos anos com o objectivo de reduzir o ruído rodoviário.

Os níveis de ruído associados a uma determinada superfície apresentam de uma forma geral uma variabilidade elevada. No entanto, a título de exemplo referem-se os obtidos em França

para a velocidade de 90 km/h em camadas delgadas de porosidade média e com agregados de dimensão máxima de 6 mm e de 10 mm que são cerca de 74 dB e 76 dB, respectivamente. Em camadas de porosidade elevada e dimensão máxima do agregado de 6 mm foram observados níveis de emissão de ruído de 72 dB (Bendtsen e Raaberg, 2006).

Neste documento caracteriza-se um conjunto de superfícies usadas actualmente na reabilitação dos pavimentos rodoviários, na sua maioria delgadas, através de dois métodos de medição do ruído: o método da proximidade imediata e o método da passagem controlada.

Mecanismos de geração de ruído rodoviário

O ruído ambiente de origem rodoviária resulta da contribuição das emissões dos veículos que circulam em determinada via de tráfego. Considerando o sistema automóvel composto por várias fontes sonoras, verifica-se que a fonte preponderante corresponde à interacção pneu-pavimento, na gama de velocidades usualmente praticadas.

Assim, para baixas velocidades predomina a componente do ruído do motor, enquanto que para velocidades acima dos 50 km/h o efeito do contacto pneu/pavimento é a principal fonte de ruído.

Os mecanismos de geração de ruído associados à interacção pneu/pavimento referem-se: (i) às vibrações, que resultam do contacto dos pneus na superfície e da aderência, e (ii) ao efeito de bombeamento de ar que ocorre no momento em que o pneu interage com a superfície (Sandberg e Ejsmont, 2002). Estes são, por um lado, amplificados devido ao efeito de pavilhão. Por outro lado, podem ser amplificados ou atenuados em função da relação entre a impedância acústica e mecânica da superfície e da frequência de ressonância do sistema roda/pneu (SILVIA, 2006).

Além disso, os mecanismos referidos são influenciados 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).

MÉTODOS DE MEDIÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

A avaliação do ruído de tráfego pode ser feita sob duas vertentes, a ambiental e a do pneu/pavimento. Na vertente ambiental, actualmente o Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro, estabelece e articula o novo Regulamento Geral do Ruído com outras normas e/ou regimes jurídicos.

Os parâmetros de ruído usados para a avaliação do ruído ambiental são o L_{den} , que agrega o ruído nos períodos diurno-entardecer-nocturno, e o L_n , que é o nível sonoro médio de longa duração no período nocturno (das 23 às 7 horas), cujos limites máximos foram estabelecidos em função da classificação da zona onde se está a efectuar a medição.

Na outra vertente, vários são os métodos que têm vindo a ser utilizados para a comparação do desempenho acústico de superfícies de estradas. De entre os métodos mais utilizados destacam-se os seguintes:

- Método da proximidade imediata (Close **ProX**imity method, CPX);
- Método estatístico de passagem (Statistical **Pass-By** method, SPB);
- Método da passagem controlada (Controlled **Pass-By** method, CPB).

Método da proximidade imediata

A medição do ruído pelo método CPX pode ser realizada de duas formas: (i) utilizando um atrelado normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e pelo menos dois microfones junto do pneu ou, alternativamente, (ii) os microfones são colocados junto a uma roda do próprio veículo. O esquema de montagem dos microfones deve estar de acordo com o definido na norma ISO CD 11819-2.

Método estatístico de passagem

O método SPB baseia-se na medição dos níveis máximos de pressão sonora, ponderada A, pela passagem de um número considerável de veículos com significado estatístico de diversas categorias, num trecho específico da estrada para as velocidades de circulação recomendadas (ISO 11819-1, 1997). O microfone deverá estar localizado a $1,2\text{m} \pm 0,1\text{m}$ acima do plano da faixa de rodagem e a 7,5m da linha central da via de tráfego. Assim, a cada passagem individual de um veículo, o nível sonoro (máximo) e a velocidade do veículo são registados.

Os níveis de ruído dos veículos ligeiros, veículos pesados de eixo duplo e veículos pesados de eixo múltiplo são adicionados, assumindo determinadas proporções destas categorias de veículos, para fornecer um único "índice" que constitua o resultado final. Este índice é designado por Índice Estatístico de Passagem (SPBI) e pode ser usado na comparação da camada superficial de pavimentos rodoviários, de modo a que a sua influência no nível de ruído de um fluxo de tráfego misto possa ser determinada.

Método de passagem controlada

O método da passagem controlada, CPB, é semelhante ao método SPB (Sandberg e Ejsmont, 2002). Neste método, os veículos de ensaio são seleccionados e as restantes condições, como a velocidade, o tipo de pneu, a mudança engrenada no veículo e o número de passagens, são controladas.

O ensaio do tipo SPB é considerado o mais adequado para a quantificação do ruído total na berma da estrada ou imediações, uma vez que contabiliza todos os tipos de fontes de ruído rodoviário, e os efeitos de absorção no solo entre a fonte sonora e o receptor, em vez de apenas os componentes pneu/pavimento, como é o caso do ensaio do tipo CPX.

Para além do SPBI, não foram desenvolvidos outros índices especificamente para a avaliação do ruído de contacto pneu-pavimento. No entanto, o nível sonoro máximo (L_{max}) tem sido usado como parâmetro associado ao ruído de contacto pneu/pavimento.

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Metodologia de ensaio

Para a avaliação do ruído de contacto pneu-pavimento foram seleccionados dois métodos de ensaio: o método da passagem controlada (CPB) e o método da proximidade imediata (CPX).

O método CPB foi preferido ao método estatístico de passagem (SPB), uma vez que na zona norte de Portugal, de um modo geral, as estradas são caracterizadas por elevados declives, rectas pouco extensas e elevados volumes de tráfego. Estas razões constituem dificuldades de operação que podem tornar os resultados das medições pouco credíveis.

Assim, de modo a garantir a fiabilidade dos resultados, as medições foram realizadas na sua generalidade durante a noite com o tráfego normal cortado em ambos os sentidos, de modo a eliminar a influência da passagem de veículos não pertencentes ao conjunto de teste. O ruído foi medido a cada passagem de pelo menos 2 veículos ligeiros e 1 pesado, com o motor ligado e a velocidade de circulação constante, compreendida entre 50km/h e 130km/h. Foram registadas 470 passagens válidas.

Para a medição do ruído pelo método CPX, foi desenvolvido um sistema de suporte para dois microfones colocados junto a uma das rodas traseiras de um veículo de ensaio, cuja posição e metodologia de análise dos resultados se encontra definida na norma ISO CD 11819-2. Para a análise dos resultados em pós-processamento foi desenvolvido um programa na plataforma MATLAB.

Caracterização das camadas de desgaste

As camadas superficiais de pavimentos rodoviários avaliadas são do tipo flexível, incluindo camadas em betão betuminoso drenante, camadas em betão betuminoso denso e camadas delgadas de granulometria descontínua com e sem incorporação de borracha. Este último grupo inclui duas camadas cuja granulometria foi otimizada para a redução do ruído. Na totalidade foram estudadas 14 camadas superficiais, identificadas pelas siglas de S1 a S14 e pelas seguintes características:

Camadas delgadas, de espessura compreendida entre 2,5 e 4,0 cm

- Superfícies S1 – é uma mistura de granulometria descontínua, de reduzida percentagem de vazios que pode ser incluída no grupo dos betões betuminosos rugosos (BBR);
- S2 e S5 – são misturas de granulometria descontínua com menos de 6% de volume de vazios que podem ser incluídas no grupo dos microbetões betuminosos rugosos (MBR);
- Superfície S3 – é uma mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha (MBR-BMB);
- Superfícies S6, S7 e S13 – são misturas betuminosas abertas com betume modificado com borracha (MBA-BMB), com cerca de 13% de volume de vazios e 18 a 20% de borracha (relativamente ao peso do betume);
- Superfícies S10 e S11 – são misturas betuminosas abertas (MA) de granulometria otimizada, com 15% e 18% de vazios, respectivamente.

Betão betuminoso drenante (BDr)

- Superfícies S9 e S14 – com 4 cm de espessura e cerca de 22% de vazios.

Betão betuminoso (BB)

- Superfícies S4, S8 e S12 – integram-se no tipo mais comum de superfícies em Portugal. Utilizam-se em todas as categorias de estradas (rurais e urbanas).

No Quadro 1 apresenta-se para cada superfície, identificada pelo respectivo acrónimo seguido da dimensão máxima do inerte que caracteriza a mistura, a profundidade média da textura

determinada de acordo com as normas ASTM E965-96 e ISO 13473-1:1997 e a idade na data do ensaio. Estas propriedades são relevantes para a classificação acústica das superfícies.

Quadro 1 – Propriedades das misturas

Superfície	Profundidade da textura (mm)	Idade na data do ensaio (anos)
S1(BBR12)	1,0	1
S2(MBR6)	0,6	2
S3(BBR-BMB15)	0,6	7
S4(BB16)	0,7	10
S5(MBR7)	0,6	4
S6(MBA-BMB12)	0,7	< 1
S7(MBA-BMB10)	0,8	< 1
S8(BB16*)	0,9	Após construção
S9(BDr15)	1,5	Após construção
S10 (MA-8)	1,0	< 1
S11(MA-8)	1,3	< 1
S12(BB12)	0,7	< 1
S13 (MBA-BMB12)	-	1
S14(BDr15)	-	2

Condições climáticas

A temperatura, a velocidade do vento e a água são factores responsáveis por variações consideráveis dos níveis de ruído. Para se assegurar que as medições de ruído são válidas, a velocidade do vento deve ser inferior a 5 m/s, a temperatura do ar deve estar compreendida entre 5 e 30°C, a temperatura da superfície entre 5 e 50°C e a superfície deve estar seca (ISO 11819-1, 1997). Estes parâmetros foram medidos a cada passagem dos veículos, nunca tendo sido ultrapassados. Contudo, não foram feitas correcções devido ao efeito da temperatura.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Considerações iniciais

O método CPX consiste em medir o ruído junto a uma roda do veículo, em campo próximo. Desta forma, apenas as fontes sonoras associadas à geração de ruído de interacção pneu-pavimento são convenientemente analisadas.

Nos métodos SPB e CPB o microfone é colocado a uma distância considerável do veículo, correspondendo a uma medição em campo distante. Para esta distância, o veículo pode ser modelado por uma fonte sonora equivalente constituída pela contribuição da radiação sonora proveniente, essencialmente, pelas quatro rodas, considerando que o ruído devido ao motor e sistema de exaustão, é desprezável para as velocidades consideradas. A estimação dos níveis de ruído é feita considerando a atenuação introduzida pelo caminho de propagação entre o veículo e o receptor. Esta atenuação é devida à dispersão em espaço livre das ondas acústicas e pela absorção introduzida pelo pavimento (a atenuação do meio de transmissão, devido às trocas de energia entre as partículas de ar, é considerada insignificante).

Desempenho acústico baseado no método da passagem controlada – CPB

Nas Figuras 1 a 3 apresenta-se o nível de ruído máximo calculado pela recta de regressão do nível de ruído versus logaritmo da velocidade para as velocidades de 50, 70 e 90 km/h de 12 das 14 superfícies seleccionas (S1 a S12).

Para os três níveis de velocidade observa-se uma diferença significativa de cerca de 10 dB(A) entre as superfícies mais silenciosa (S11) e mais ruidosa (S3). Tendo em conta o efeito da dimensão máxima do agregado no ruído de contacto pneu-pavimento, o desempenho da superfície S5 é pior do que as outras com granulometria semelhante. Este desempenho pode ser explicado pelo facto da idade do pavimento ser superior e pelo elevado volume de tráfego. Por este motivo, a superfície (S5) não será utilizada na análise.

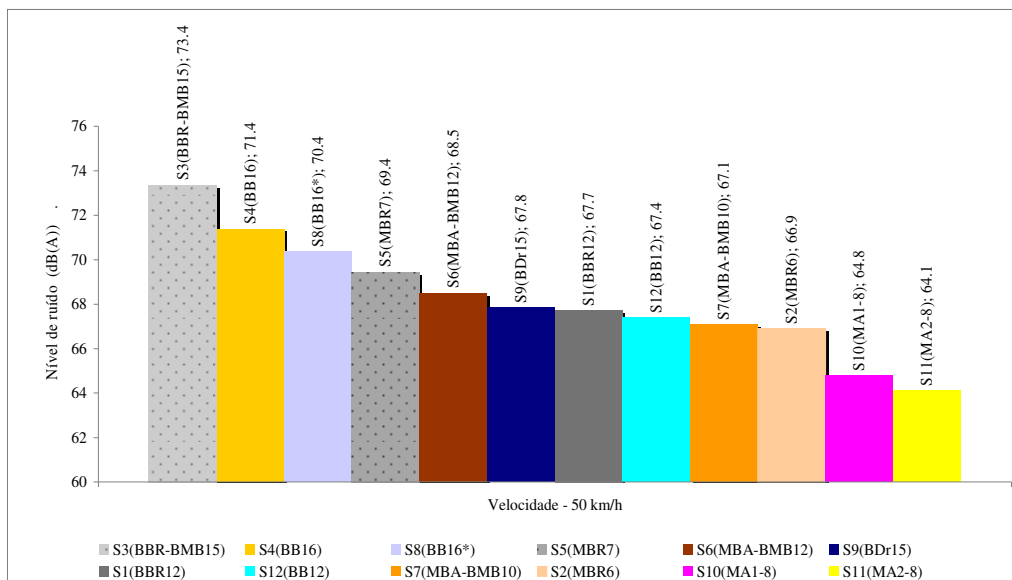


Figura 1 – Nível máximo de ruído para velocidade de 50 km/h utilizando o método CPB

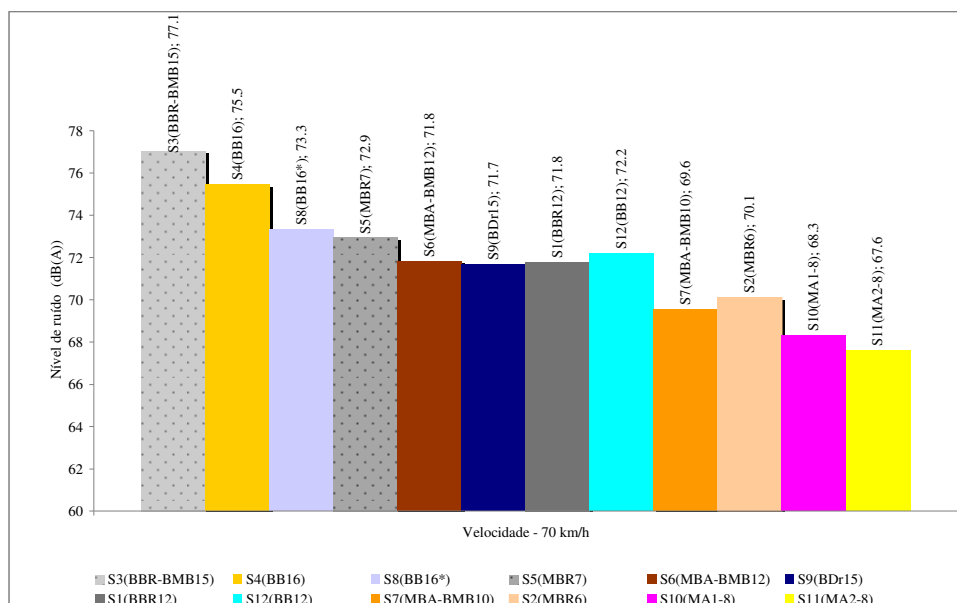


Figura 2 – Nível máximo de ruído para velocidade de 70 km/h utilizando o método CPB

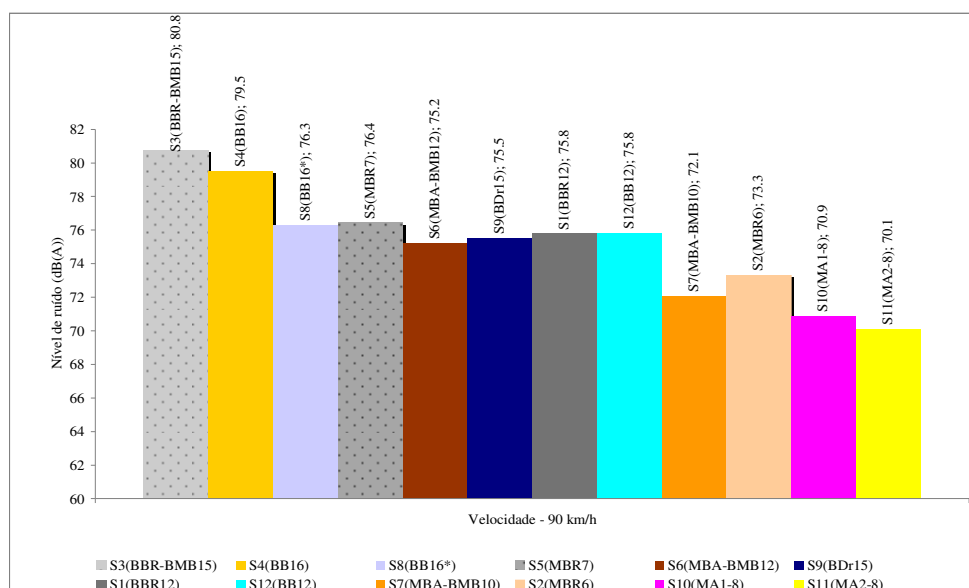


Figura 3 – Nível máximo de ruído para velocidade de 90 km/h utilizando o método CPB

É possível identificar 3 grupos de superfícies com desempenho semelhante para as velocidades de 70 e 90 km/h:

- i) o primeiro grupo, de desempenho fraco, caracteriza-se por uma dimensão elevada dos agregados (superfícies S3, S4 e S8);
- ii) o segundo grupo tem um desempenho intermédio e semelhante (S1, S6, S12), com uma dimensão máxima do agregado de 12 mm, inclui também a superfície drenante S9;
- iii) o terceiro grupo, com o melhor desempenho, caracteriza-se por uma dimensão máxima do agregado inferior a 10 mm (superfícies S2, S7 e S11).

Para a velocidade de 50 km/h, o desempenho do grupo intermédio e do terceiro grupo (com melhor desempenho) é semelhante verificando-se o contrário para 90 km/h.

Desempenho acústico baseado no método da proximidade imediata - CPX

As superfícies avaliadas pelo método CPX foram apenas 5: superfícies S10 a S14. Na Figura 4 apresenta-se níveis máximos de ruído para as velocidades de ensaio de 50, 80 e 110 km/h.

Apesar do número reduzido de superfícies observadas, verifica-se que o método CPX, consistindo numa medição em campo próximo, é menos sensível ao tipo de superfície e à velocidade de ensaio do que o método CPB. No método CPB o fenómeno de propagação do ruído entre o emissor (veículo) e receptor determina o nível de ruído global medido e depende do tipo de superfície e da sua idade.

Neste estudo, os níveis de ruído gerados pelas superfícies S10 e S11 têm aproximadamente o mesmo valor. As diferenças de nível de ruído entre estas superfícies e a superfície S12 é de cerca de 3 dB(A) para todos os valores de velocidade, enquanto que pelo método CPB essas diferenças aumentaram para cerca de 5 dB(A) a 70 km/h e a 90 km/h.

Considerando as 5 superfícies estudadas, a S13 e a S14 são responsáveis pelos níveis de ruído mais elevados. Embora estas misturas tenham porosidades elevadas, a granulometria dos agregados, que não é otimizada para a redução do ruído, deverá ter contribuído significativamente para os níveis de ruído gerados e registados em campo próximo.

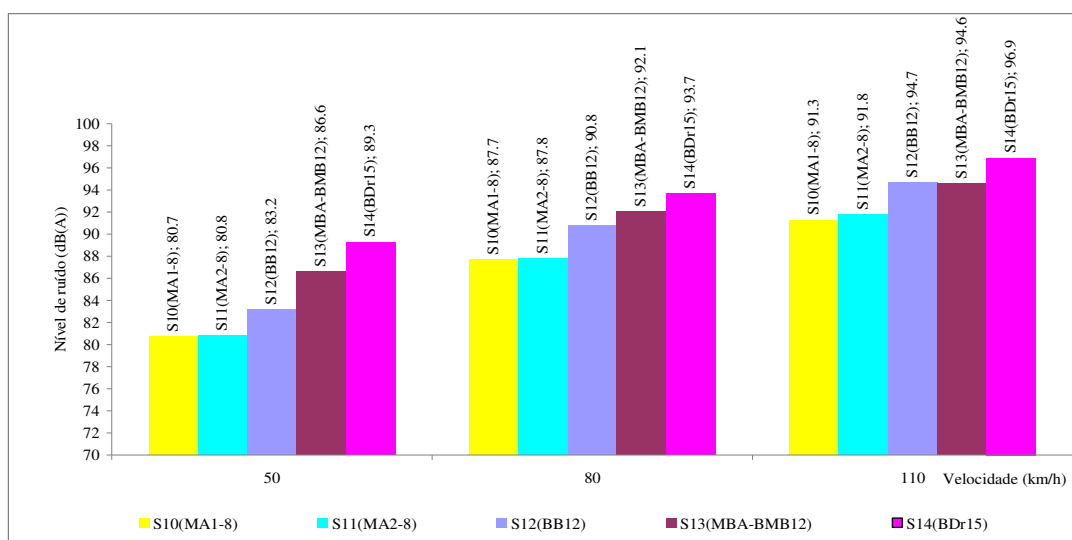


Figura 4 – Nível de ruído máximo para o veículo ligeiro instrumentado

Estes resultados mostram que o agrupamento de superfícies com o mesmo desempenho acústico por este método leva a resultados provavelmente diferentes dos obtidos anteriormente. Por este motivo, os resultados obtidos pelo método CPX devem ser complementados pela análise de outros parâmetros capazes de explicarem as diferenças encontradas, nomeadamente pela análise avançada da textura e do efeito de atenuação devido ao tipo de superfície.

Para 3 das superfícies estudadas (S10, S11 e S12), sendo que a superfície S12 foi dividida em 2 partes por ter texturas superficiais diferentes, são apresentados no Quadro 2 os níveis de ruído estimados a partir da curva de regressão linear para cada velocidade de referência. A regressão linear foi definida a partir de L_{max} e do logaritmo da velocidade.

Quadro 2 – Nível de ruído para as velocidades de referência para o método da estrada proximidade

Tipo de veículo	Velocidade (km/h)	Nível de ruído (dB(A))				
		S10(MA1)	S12(BB1)	S12(BB2)	S11(MA2)	Max-Min
Ligeiro	50	81,0	83,8	82,7	80,9	2,9
	80	87,4	90,5	90,0	87,1	3,1
	110	91,8	95,0	95,0	91,3	3,3

Os níveis de ruído medidos em campo próximo aumentam de uma forma geral 6 a 7 dB(A) para um aumento de velocidade de 50 para 80 km/h e 4 a 5 dB(A) para um aumento de velocidade de 80 para 110 km/h. Os valores mais reduzidos correspondem aos gerados com a utilização da mistura MA2, mais porosa, embora as diferenças sejam desprezáveis relativamente à mistura MA1. No entanto, observa-se que estas misturas apresentam emissões de ruído de cerca de 3 dB(A) abaixo da mistura BB1. Apesar das misturas BB1 e BB2 serem iguais conceptualmente, a textura superficial é ligeiramente diferente explicando a variação dos níveis de ruído a velocidades mais baixas.

Análise do espectro de ruído

O espectro de ruído de emissão correspondente às 3 superfícies estudadas mais detalhadamente (S10, S11 e S12) é mostrado na Figura 5. Observa-se uma diferença de cerca

de 1 dB entre as misturas BB e cerca de 5 dB entre as BB e MA, para as bandas de frequência compreendidas entre os 800Hz e os 2500Hz. Este resultado mostra o óptimo desempenho das camadas delgadas de desgaste.

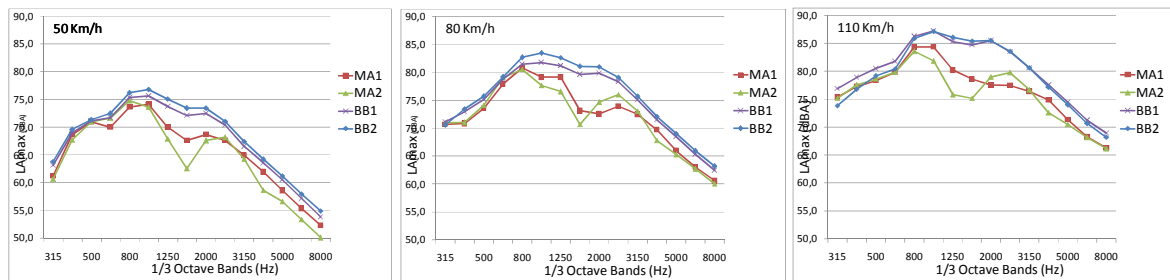


Figura 5 – Espectro do ruído medido com o sistema CPX para diferentes tipos de pavimentos para as velocidades recomendadas.

A Figura 6 apresenta os espectros de ruído analisados pelos métodos CPX e CPB para as velocidades recomendadas. Considerando que associado a cada método de medida estão presentes fenomenologias físicas diferentes, os espectros apresentam um andamento em frequência bastante distinto. Observa-se uma redução significativa da energia, sensivelmente na banda de frequências centrada em 1600Hz, utilizando o método CPX. No método CPB, o ruído medido tem várias componentes sendo constituído pela fonte de ruído veículo, que engloba essencialmente o ruído gerado pelas quatro rodas e a radiação devida à vibração da estrutura, e pela atenuação acústica introduzida pelo pavimento entre o veículo e o receptor.

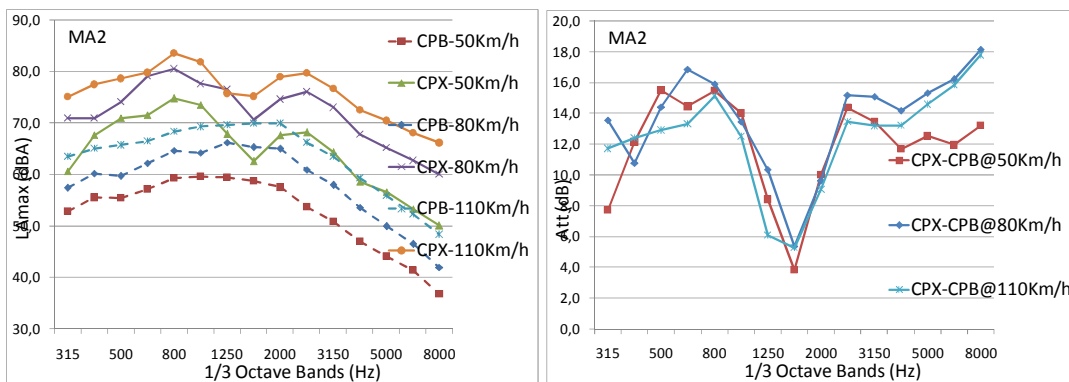


Figura 6 – Espectros de amplitude do ruído de rolamento através dos métodos CPX e CPB (lado esquerdo) e atenuação introduzida (lado direito), para as camadas delgadas MA para as velocidades recomendadas.

CONCLUSÕES

Este artigo abordou sucintamente as metodologias de medição do ruído de contacto pneu-pavimento que foram a seguir utilizadas na caracterização da emissão de ruído em 14 superfícies, na sua maioria superfícies delgadas. O método da Passagem Controlada (CPB) foi aplicado em 12 superfícies e método da proximidade imediata (CPX) em 5 superfícies.

A partir dos ensaios CPB foram identificados 3 grupos de desempenho acústico semelhante: o primeiro, composto por superfícies com elevada dimensão máxima do agregado, é caracterizado por um desempenho fraco (S3, S4 e S8); o segundo grupo, com um desempenho intermédio e agregados de dimensão máxima de 12 mm, é composto por misturas de granulometria descontínua (S1, S6 e S12) e por betão betuminosos drenante (S9); o terceiro,

com o melhor desempenho, também é composto por misturas abertas e de granulometria descontínua, com dimensão máxima do agregado inferior a 10 mm (S2, S7, S10 e S11).

O primeiro grupo integra as duas superfícies em betão betuminoso denso utilizadas como referência e o terceiro grupo integra apenas misturas de espessura reduzida.

Os resultados obtidos pelo método CPX indicam que de uma forma geral é possível uma redução de ruído na fonte de cerca de 3 dB(A). Redução essa que aumenta até cerca de 7 dB(A) para a velocidade de 110 km/h quando o receptor se encontra a 7.5 m da fonte (método de ensaio CPB). Indicam também que as misturas de espessura mais elevada, que incorporam agregados de dimensões também mais elevadas, geram ruído de nível superior.

A partir da análise do espectro de ruído observou-se uma diferença de cerca de 5 dB entre a mistura em betão betuminoso e as misturas abertas delgadas, para as bandas de frequência compreendidas entre os 800Hz e os 2500Hz que mostra o óptimo desempenho das camadas delgadas de desgaste.

AGRADECIMENTOS

Parte da investigação foi suportada pelo financiamento plurianual FCT-CAPS/IST através do programa POS_C e fundos do FEDER.

REFERÊNCIAS

ASTM E965-96 (2006). Standard Test Method for Measuring Pavement Macrotexture Depth Using a Volumetric Technique. American Society for Testing and Materials.

Bendtsen, H. and Raaberg, J. (2006). “French Experiences on Noise Reducing Thin Layers”, Report, Denmark, Disponível em <http://www.vejdirektoratet.dk/publikationer/VInot028/index.htm>.

ISO CD 11819-2. Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: The Close Proximity Method. International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland.

ISO 11819-1(1997). Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method. International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland.

ISO 13473-1(1997). Characterization of pavement texture by use of surface profiles – Part 1: Determination of Mean Profile Depth. International Organisation for Standardisation (ISO), Geneve, Switzerland

Sandberg, U., Ejsmont, J. (2002). *Tyre / Road Noise Reference Book*. Informex SE – 59040. Kisa. Sweden (www.informex.info).

SILVIA (2006). Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces. FEHRL report 2006/02. Forum of European National Highway Research Laboratories, Brussels, Belgium.