



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

DEPARTAMENTO DE TRANSPORTES
Núcleo de Infra-Estruturas Rodoviárias
e Aeroportuárias

Proc. 0702/16/15698

CAMADAS DE DESGASTE PARA A REDUÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

Avaliação do Ruído em Pavimentos em Serviço

Estradas de Portugal

Lisboa • Dezembro de 2011

I & D TRANSPORTES

RELATÓRIO 376/2011 – NIRA

CAMADAS DE DESGASTE PARA A REDUÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO

Avaliação do Ruído em Pavimentos em Serviço

ROAD PAVEMENT SURFACES FOR TRAFIC NOISE REDUCTION

Evaluation of Traffic Noise on In-service Pavements

SURFACES POUR LA REDUTION DU BRUIT DE ROULLEMENT

Evaluation du Bruit de Roulement de Chaussées en Service

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objectivos.....	1
1.2	Programa de trabalhos.....	1
2	SECÇÕES DE PAVIMENTO ENSAIADAS.....	3
2.1	Critérios de selecção.....	3
2.2	Identificação das secções de pavimento ensaiadas.....	3
2.3	Caracterização superficial das secções de pavimento	5
3	AVALIAÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO	7
3.1	Métodos de avaliação do ruído de tráfego em pavimentos	7
3.2	Métodos usados no estudo	10
3.3	Avaliação do ruído pelo método “Statistical Pass By” (SPB).....	11
3.3.1	<i>Metodologia</i>	11
3.3.2	<i>Veículos ligeiros</i>	12
3.3.3	<i>Veículos pesados</i>	16
3.4	Avaliação do ruído pelo método “Controlled Pass By” (CPB).....	17
3.5	Avaliação do ruído pelo método “Close Proximity” (CPX)	21
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	24
4.1	Apreciação geral dos resultados.....	24
4.2	Influência do tipo de camada de desgaste no ruído produzido pelos veículos	25
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	26
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1	Tipos de camada de desgaste ensaiados e respectivos acrónimos.....	4
Quadro 2	Identificação das secções ensaiadas.....	4
Quadro 3	Características superficiais das secções ensaiadas.....	6
Quadro 4	Velocidades de referência (V_{ref}) e factores de ponderação (W_x) [5].....	9
Quadro 5	Ensaio efectuado nos trechos de estudo	11
Quadro 6	Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados a 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h relativos aos veículos ligeiros nas secções observadas	13
Quadro 7	Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados a 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h relativos aos veículos ligeiros nas secções observadas pelo método CPB.....	18
Quadro 8	Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados a 30 km/h, 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h relativos ao veículo híbrido nas secções observadas (CPB).....	19
Quadro 9	Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados às velocidades de 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h nas secções observadas pelo método CPX	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perfilómetros laser utilizados na caracterização superficial dos pavimentos	5
Figura 2 Medição da profundidade de textura pelo método da mancha.....	5
Figura 3 Posição dos microfones para medição do ruído utilizando o método CPX.....	7
Figura 4 Configuração do ensaio pelo método estatístico de passagem	8
Figura 5 Regressão entre níveis de ruído e velocidades de circulação de veículos ligeiros na EN 370, sentido Arraiolos-Avis	14
Figura 6 Parâmetro "declive da recta de regressão" relativo aos veículos ligeiros	14
Figura 7 Nível de ruído máximo (LA_{max}) para a velocidade de 50 km/h dos veículos ligeiros.....	15
Figura 8 Nível de ruído máximo (LA_{max}) para a velocidade de 80 km/h dos veículos ligeiros.....	15
Figura 9 Nível de ruído máximo (LA_{max}) para a velocidade de 110 km/h dos veículos ligeiros.....	16
Figura 10 Regressão entre níveis de ruído e velocidades de circulação de veículos pesados da categoria L2a no IP7 – Eixo Norte-Sul, via direita	17
Figura 11 Nível de ruído máximo (LA_{max}) dos veículos ligeiros pelo método CPB	19
Figura 12 Nível de ruído máximo (LA_{max}) do veículo híbrido (CPB).....	20
Figura 13 Diferença de nível de ruído máximo entre os veículos ligeiros e o veículo híbrido (CPB)	20
Figura 14 Sistema de aquisição usado no ensaio CPX	21
Figura 15 Resultados obtidos no ensaio CPX.....	22

1.1 Objectivos

Na sociedade actual o ruído é um dos principais tipos de poluição ambiental que afecta as populações, sendo o ruído provocado pelo tráfego rodoviário uma das fontes de ruído dominantes. O ruído de tráfego, tradicionalmente associado ao funcionamento dos motores dos veículos, tem vindo a ser reduzido nos últimos anos. Em contrapartida, tem sido dada uma importância cada vez maior ao ruído de rolamento, ou seja, o ruído resultante da interacção entre o pneu e a superfície do pavimento rodoviário.

Tendo em vista dispor de mecanismos para controlar o ruído de tráfego e responder à Directiva Europeia 202/49/EC, têm vindo a ser desenvolvidos diversos projectos de investigação, quer de âmbito nacional, quer de âmbito Europeu, que têm como objectivos a promoção da utilização de camadas de desgaste de pavimentos que contribuam para a redução do ruído de tráfego.

Nesse contexto, foi estabelecido um Protocolo de Cooperação entre a Estradas de Portugal (EP, S.A.) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com vista ao estudo de técnicas a aplicar em camadas de desgaste dos pavimentos rodoviários, que proporcionem uma diminuição do ruído produzido pela passagem dos veículos. No âmbito deste Protocolo prevê-se a execução de um conjunto de trechos experimentais nos quais sejam aplicados diferentes tipos de camadas de desgaste, considerados mais promissores do ponto de vista da redução do ruído produzido pela passagem do tráfego, e a caracterização do desempenho das soluções ensaiadas. Para além da caracterização do ruído produzido pelo tráfego quando circula sobre as camadas de desgaste aplicadas nos trechos experimentais, considera-se importante quantificar o ruído produzido em diferentes tipos de camadas de desgaste correntemente aplicados em Portugal, quando em serviço.

1.2 Programa de trabalhos

O programa de trabalhos acordado entre o LNEC e a EP prevê o desenvolvimento do estudo em 3 fases, conforme se transcreve em seguida:

- *Fase 1* – Nesta primeira fase realiza-se uma avaliação do ruído induzido pela passagem do tráfego em diferentes locais da rede Nacional, considerados representativos dos diversos tipos de camadas de desgaste aplicados em Portugal, e seleccionados em colaboração com os técnicos da EP.

Os trabalhos a realizar pelo LNEC na fase 1 incluem a caracterização superficial de cada secção, a medição do ruído produzido pela passagem do tráfego nesses locais, em função do tipo de veículos e das velocidades praticadas. Os resultados obtidos são objecto de um relatório.

- *Fase 2 – Esta segunda fase compreende a realização de um conjunto de trechos experimentais inseridos num troço de estrada a seleccionar pela EP, nos quais sejam aplicados diferentes tipos de camadas de desgaste, considerados mais promissores do ponto de vista da redução do ruído produzido pela passagem do tráfego.*

A selecção dos tipos de camadas de desgaste a aplicar será fundamentada numa pesquisa bibliográfica, tendo em atenção as condições específicas do nosso país e os resultados obtidos na fase 1.

A par das técnicas consideradas “promissoras”, será executado um trecho de referência, no qual se utilizam os materiais correntemente utilizados em camadas de desgaste de pavimentos flexíveis. No total, prevê-se a execução de um mínimo de 4 trechos experimentais.

O LNEC acompanhará a execução dos trechos experimentais, realizará ensaios para a avaliação do comportamento estrutural e para a caracterização das camadas de desgaste executadas, e efectuará a medição do ruído produzido pela passagem do tráfego nesses locais, bem como a caracterização do tráfego que aí circula, e respectivas velocidades praticadas. No final desta segunda fase será executado um relatório com os resultados obtidos.

- *Fase 3 – Esta fase compreende a observação do comportamento a longo prazo das soluções testadas, tendo em especial atenção avaliar a manutenção das suas propriedades de absorção do ruído ao longo do tempo. O planeamento detalhado desta terceira fase será realizado após a conclusão das fases anteriores.*

Neste Relatório apresentam-se e discutem-se os resultados obtidos na fase 1, com vista à caracterização do ruído em camadas de desgaste de pavimentos em serviço.

Os trabalhos a que se refere o presente Relatório foram executados em parceria com a Universidade do Minho (UM) e com o Centro de Análise e Processamento de Sinais do Instituto Superior Técnico (CAPS/IST).

2.1 Critérios de selecção

Conforme referido anteriormente, pretendia-se, na primeira fase do estudo, efectuar a avaliação do ruído induzido pela passagem do tráfego em diferentes locais da Rede Rodoviária Nacional, considerados representativos dos diversos tipos de camadas de desgaste aplicados em Portugal.

Para a selecção das secções de pavimento a ensaiar, foram tidos em consideração diversos aspectos que, de acordo com a experiência relatada na bibliografia, influenciam o ruído produzido pela passagem do tráfego, designadamente:

- O tipo de material aplicado camada de desgaste;
- A idade da camada de desgaste;
- O volume de tráfego após entrada em serviço.

Tendo em atenção que a percentagem de pavimentos com camada de desgaste em betão no nosso país é diminuta e que, nos poucos troços que existem com este tipo de camada de desgaste não foram utilizados acabamentos que permitam reduzir o ruído, optou-se por estudar apenas secções com camadas de desgaste em materiais betuminosos.

No universo das misturas betuminosas habitualmente aplicadas em camadas de desgaste em Portugal procurou-se avaliar diversos aspectos passíveis de influenciar o comportamento das camadas, do ponto de vista acústico, tais como:

- A porosidade das misturas betuminosas;
- A macro-textura superficial;
- A dimensão máxima dos agregados da camada de desgaste;
- A utilização de betumes modificados com borracha em diversas percentagens.

Finalmente, refere-se que o conjunto de secções de pavimento seleccionadas para ensaio inclui secções com camada de desgaste em betão betuminoso convencional e que a selecção das secções foi ainda condicionada por aspectos operacionais, tais como a possibilidade de condicionar temporariamente a circulação do tráfego para a realização de alguns ensaios.

2.2 Identificação das secções de pavimento ensaiadas

No decurso deste estudo realizaram-se ensaios em 20 secções de pavimento, correspondendo a 9 tipos distintos de camadas de desgaste. O Quadro 1 apresenta os tipos de camada de desgaste e os acrónimos pelos quais serão doravante designados, e o Quadro 2 apresenta a identificação das secções ensaiadas. De entre os troços de estrada seleccionados, 4 foram ensaiados nos dois sentidos.

Quadro 1 | Tipos de camada de desgaste ensaiados e respectivos acrónimos

Tipo de camada de desgaste	Acrónimo
Betão betuminoso	BB
Betão betuminoso drenante	BBd
Betão betuminoso rugoso	BBr
Microaglomerado a frio duplo	mAF
Microbetão betuminoso rugoso	mBBr
Mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha – alta percentagem de borracha	MBA BBA
Mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha - média percentagem de borracha	MBA BBM
Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha – alta percentagem de borracha	MBR BBA
Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha por via seca	MBR BBS

Quadro 2 | Identificação das secções ensaiadas

Estrada	Local (km)	Camada de desgaste				Tráfego (TMD)
		Tipo	Espessura (mm)	Dim. max. do agregado (mm)	Data de aplicação	
Variante EN 205 / EN 210	Arco do Baulhe	BB	50	14	2009	6.000
IC 1 - Ourique / Santana da Serra	687+300	BB	50	14	2005	7.834
A 11 - Braga / Vila Seca	6+000	BBd	40	–	2005	–
IP 7 - Eixo N/S, Lisboa (via central)	Saída Alto do Lumiar Norte	BBd	40	12,5	2008	–
IP 7 - Eixo N/S, Lisboa (via direita)						
A 7 - Fafe / Basto	70+850	BBr	–	14	2005	–
EN 105 (St Tirso)	20+800	mAF	–	14	1999	9.831
IC 2 (prox. Avelãs de Caminho) (*)	220+050	mAF	–	6	2010	24.000
IP 8 - Grândola / Sines	14+100	mAF	–	6	2004	8.346
IC 33 - Grândola / Sines	14+200	mBBr	30	10	2005	–
EN 201 (*)	Recta da Laje	MBA BBA	–	10	2005	–
EN 14 - Trofa / Braga	36+600	MBA BBA	30	12	2006	24.000
EN 205-3 - Rendufe / Terras de Bouro (*)	0+400	MBA BBM	40	10	2008	–
IC 12 (Canas de Senhorim)	19+000	MBA BBM	60	10	2008	7.403
IC 1 - Ourique / Santana da Serra	687+150	MBR BBA ⁽¹⁾	40	14	2005	7.834
EN 370 - Avis / Arraiolos (*)	22+030	MBR BBS	40	14	2009	3.110

(*) Secções ensaiadas nos dois sentidos

⁽¹⁾ Salienta-se que a mistura aparentava possuir agregados com dimensão máxima superior aos da secção adjacente em betão betuminoso

2.3 Caracterização superficial das secções de pavimento

As secções ensaiadas foram sujeitas a ensaios de caracterização superficial, em particular no que se refere à caracterização do perfil da superfície. Foram realizados ensaios com os perfilómetros laser do LNEC e da UM (Figura 1), bem como ensaios para determinação da profundidade média de textura pelo método da mancha (Figura 2), tendo sido determinados os seguintes parâmetros:

- Índice de Irregularidade Internacional (*International Roughness Index*, IRI) [1];
- Profundidade média do perfil (MPD) [2]; e
- Profundidade de textura pelo método volumétrico da mancha (MTD) [3].

No Quadro 3 apresentam-se os resultados dos ensaios. Os valores obtidos com o perfilómetro laser (IRI e MPD) correspondem à média dos valores obtidos num intervalo de 100 m na vizinhança do ponto de medição do ruído, isto é, entre - 50 m e + 50 m em relação ao ponto de medição do ruído. No caso da profundidade de textura pelo método da mancha foram realizadas 10 determinações em cada local.



Figura 1 | Perfilómetros laser utilizados na caracterização superficial dos pavimentos



Figura 2 | Medição da profundidade de textura pelo método da mancha

Quadro 3 | Características superficiais das secções ensaiadas

Estrada	Camada de desgaste	Características superficiais				
		IRI (m/km)		MPD (mm)	ETD (mm)	MTD (mm)
		Rodeira esquerda	Rodeira direita	Rodeira direita	Rodeira direita	Rodeira direita
Variante EN 205 / EN 210	BB	1,57	1,66	0,766	0,813	—
IC 1 – Ourique / Santana da Serra (km 687+300)	BB	2,32	2,07	0,554	0,643	1,200
A 11 – Braga / Vila Seca	BBd	0,85	0,96	1,507	1,406	—
IP 7 – Eixo N/S, Lisboa	BBd	1,89	1,63	1,492	1,394	—
A 7 – Fafe / Basto	BBr	0,89	0,79	1,281	1,225	—
EN 105 (St Tirso)	mAF	1,88	1,85	0,775	0,820	—
IC 2 – Sentido Norte / Sul	mAF	1,29	1,33	0,433	0,546	—
IC 2 – Sentido Sul / Norte	mAF	1,79	2,03	0,519	0,615	—
IP 8 – Grândola / Sines	mAF	3,00	1,86	0,950	0,960	1,180
IC 33 – Grândola / Sines	mBBr	1,95	1,96	0,762	0,810	1,170
EN 201 – Ponte de Lima / Braga	MBA BBA	1,16	1,11	1,047	1,037	—
EN 14 – Trofa / Braga	MBA BBA	1,15	1,28	0,935	0,948	—
EN 205-3 – Sentido Terras de Bouro / Rendufe	MBA BBM	1,61	1,73	0,845	0,876	—
IC 12 (Canas de Senhorim)	MBA BBM	3,08	2,32	0,660	0,728	0,940
IC 1 – Ourique / Santana da Serra (km 687+150)	MBR BBA	1,42	1,26	0,503	0,602	1,150
EN 370 – Sentido Avis / Arraiolos	MBR BBS	1,69	2,07	0,639	0,711	0,790
EN 370 – Sentido Arraiolos / Avis	MBR BBS	1,91	1,90	0,641	0,713	0,810

Os resultados apresentados no Quadro 3 indicam que as secções em estudo possuem, em regra, uma boa regularidade longitudinal, traduzida por valores de IRI geralmente inferiores a 2,5 m/km. Exceptuam-se as secções do IP8 – Grândola Sines e do IC 12 – Canas de Senhorim, onde foram registados valores da ordem de 3 m/km na rodeira esquerda.

Em termos de macro-textura, pode-se dizer que as secções escolhidas para ensaio abrangem uma gama relativamente alargada, com valores de profundidade média do perfil (MPD) entre 0,4 e 1,0 mm, excluindo as misturas drenantes, para as quais se obtém valores da ordem de 1,5 mm.

3.1 Métodos de avaliação do ruído de tráfego em pavimentos

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, existem vários 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 (**C**lose **P**ro**X**imity method, CPX) [4];
- Método estatístico de passagem (**S**tatistical **P**ass-**B**y method, SPB) [5]; e
- Método da passagem controlada (**C**ontrolled **P**ass-**B**y method, CPB).

A medição do ruído pelo método CPX pode ser realizada de duas formas, utilizando um atrelado normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e pelo menos dois microfones, colocados junto do pneu (i) ou, alternativamente, colocados junto a uma roda do próprio veículo (ii). O esquema de montagem dos microfones deve estar de acordo com o definido na norma ISO CD 11819-2 [4] (Figura 3).

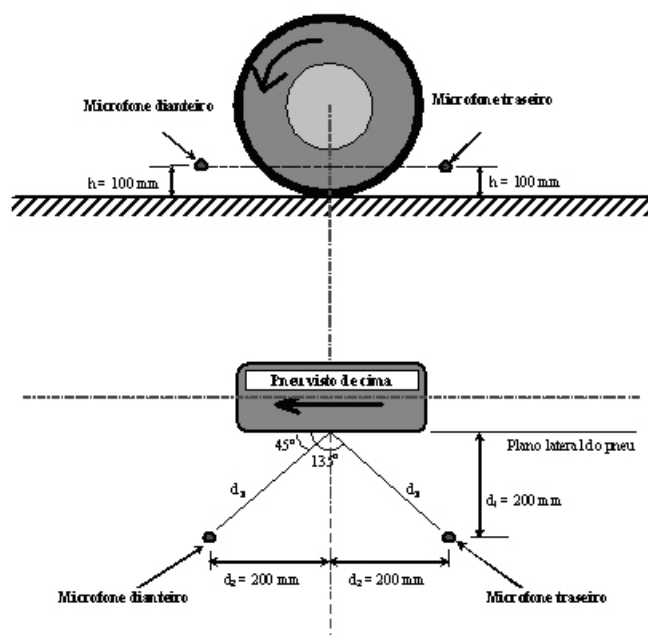


Figura 3 | Posição dos microfones para medição do ruído utilizando o método CPX

O método SPB baseia-se na medição dos níveis máximos de pressão sonora ponderada A (isto é, ponderada por meio do filtro "A"), pela passagem de um número considerável de veículos de diversas categorias, com significado estatístico, num trecho específico da estrada para as velocidades de circulação recomendadas [5].

O microfone deverá estar localizado a $1,2\text{ m} \pm 0,1\text{ m}$ acima do plano da faixa de rodagem e a $7,5\text{ m}$ 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. A configuração do ensaio encontra-se apresentada na Figura 4.

Cada veículo a avaliar é classificado numa das três categorias de veículos: "veículos ligeiros", "veículos pesados de eixo duplo" e "veículos pesados de eixo múltiplo". Não são usadas para esta avaliação outras categorias de veículos.

Nesta norma são definidas três categorias de estrada, de acordo com a escala de velocidades a que o tráfego circula, a qual está geralmente associada a determinadas áreas (urbana, suburbana, rural, etc.):

- Categoria de estrada de velocidade "baixa": condições associadas a tráfego que circula a uma velocidade média de 45 km/h a 64 km/h — velocidade de referência 50 km/h (estas condições estão geralmente associadas ao tráfego urbano);
- Categoria de estrada de velocidade "média": condições associadas a tráfego que circula a uma velocidade média de 65 a 99 km/h — velocidade de referência 80 km/h (estas condições verificam-se sobretudo em áreas suburbanas ou em estradas rurais);
- Categoria de estrada de velocidade "elevada": condições associadas a tráfego que circula a uma velocidade média de 100 km/h ou mais — velocidade de referência 110 km/h . Os veículos pesados podem circular uma velocidade média mais baixa, devido às limitações da velocidade (estas condições estão geralmente associadas a tráfego de auto-estradas em áreas rurais ou suburbanas).

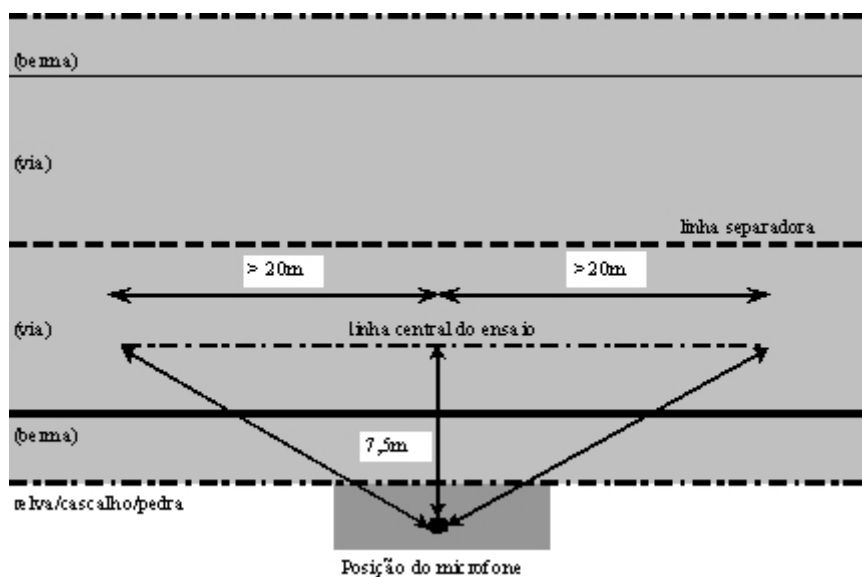


Figura 4 | Configuração do ensaio pelo método estatístico de passagem

Para assegurar que não ocorrem erros aleatórios em número inaceitavelmente elevado, recomenda-se a monitorização do seguinte número mínimo de veículos, dentro de cada categoria:

- Categoria 1 (veículos ligeiros): min 100
- Categoria 2a (veículos pesados de eixo duplo): min 30
- Categoria 2b (veículos pesados do eixo múltiplo): min 30
- Categorias 2a e 2b em conjunto (veículos pesados): min 80

Isto significa que, por exemplo, se houver 30 veículos na categoria 2a, são necessários 50 veículos dentro da categoria 2b tal que as categorias 2a e 2b contenham em conjunto, pelo menos, 80 veículos. A estipulação de números mínimos deve-se a exigências de precisão, por oposição ao tempo necessário para monitorizar o número desejado de veículos no tráfego real.

Os níveis de ruído dos veículos ligeiros, dos veículos pesados de eixo duplo e dos 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.

O valor de SPBI é calculado pela expressão:

$$SPBI = 10 \times \log_{10} \left[W_1 \times 10^{L_1/10} + W_{2a} \times (V_1/V_{2a}) \times 10^{L_{2a}/10} + W_{2b} \times (V_1/V_{2b}) \times 10^{L_{2b}/10} \right] \quad (1)$$

em que:

SPBI é o índice estatístico de passagem, para uma mistura padrão de veículos ligeiros e pesados (dB);

L_1 , L_{2a} e L_{2b} são os níveis de ruído do veículo (L_{veh}) para as categorias 1, 2a e 2b (dB), respectivamente;

W_1 , W_{2a} e W_{2b} são factores de ponderação, equivalentes às proporções assumidas de categorias de veículos no tráfego, de acordo com o Quadro 4; e

V_1 , V_{2a} e V_{2b} são as velocidades de referência de categorias individuais de veículos (km/h), de acordo com o Quadro 4.

Quadro 4 | Velocidades de referência (V_{ref}) e factores de ponderação (W_x) [5]

Categoria do veículo	Nível de velocidade do veículo					
	Baixa		Média		Alta	
	V_{ref} (Km/h)	W_x	V_{ref} (Km/h)	W_x	V_{ref} (Km/h)	W_x
(1) Ligeiro	50	0,900	80	0,800	110	0,700
(2a) Pesado de 2 eixos	50	0,075	70	0,100	85	0,075
(2b) Pesado multi-eixos	50	0,025	70	0,100	85	0,225

O nível sonoro de cada categoria de veículo (L_{veh}) calcula-se a partir da recta de regressão do nível sonoro máximo (L_{max}) versus o logaritmo decimal da velocidade, para a velocidade de referência (V_{ref}).

O método da passagem controlada, CPB, é semelhante ao método SPB. 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 caracterizar 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 tem sido usado como parâmetro associado ao ruído de contacto pneu/pavimento.

Contudo, a medição do ruído produzido pelo tráfego ao circular sobre uma determinada superfície não é a única forma de caracterizar a superfície do ponto de vista acústico. Existe um conjunto de métodos de avaliação complementares que permitem determinar as características acústicas da superfície relevantes, nomeadamente, textura, absorção sonora e impedância mecânica.

A determinação da textura é relevante para todos os tipos de superfícies, nomeadamente nas gamas da macrotextura e da megatextura. A absorção sonora é relevante apenas em superfícies com porosidade elevada e a impedância mecânica em superfícies de rigidez reduzida, como por exemplo as que incorporam borracha.

3.2 Métodos usados no estudo

Os três métodos anteriormente apresentados foram utilizados no presente estudo de acordo com o Quadro 5. O método SPB foi aplicado em todos os trechos, sendo aplicado nos dois sentidos sempre que possível. Complementarmente, embora não estivesse previsto no plano de trabalhos, aplicou-se o método CPX num número significativo de trechos, tendo em atenção o interesse prático da aplicação deste método, que permite avaliar extensões consideráveis em pouco tempo, e a vantagem de permitir efectuar comparações entre diferentes soluções de pavimentação minimizando a dependência do ambiente. Por sua vez, método CPB foi aplicado em trechos onde a interrupção da circulação normal dos veículos não implicou tempos de espera excessivos para os condutores.

3.3 Avaliação do ruído pelo método “Statistical Pass By” (SPB)

3.3.1 Metodologia

Para a avaliação do ruído pelo método SPB foi utilizada a Norma ISO 11819-1, *Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: statistical pass-by method* [5]. Não foi calculado o índice SPBI, uma vez que o número de veículos pesados passados em cada secção inviabiliza a aplicação da expressão de cálculo desse índice, de acordo com o preconizado naquela norma. Contudo, foram calculados os parâmetros estatísticos que permitem determinar as rectas de regressão L_{max} versus logaritmo decimal da velocidade e foram estimados os níveis de ruído para as velocidades de referência indicadas no Quadro 4.

A partir do parâmetro "declive da recta de regressão" é possível estudar o efeito da velocidade no nível de ruído e desta forma identificar os tipos de superfície que proporcionam maiores variações de ruído. A partir da comparação dos níveis de ruído a diferentes velocidades entre os vários tipos de superfície é possível estudar o desempenho de cada tipo de camada superficial através da seriação dos resultados obtidos por velocidade e por tipo de camada. Nas duas secções seguintes são apresentados, separadamente para veículos ligeiros e veículos pesados dos tipos L_{2a} e L_{2b} , os parâmetros estatísticos relativos à regressão L_{max} versus logaritmo decimal da velocidade e os níveis de ruído a cada nível de velocidade. No Anexo apresentam-se, em formato digital, todos os resultados obtidos nos ensaios.

Quadro 5 | Ensaios efectuados nos trechos de estudo

Estrada	Camada de desgaste	SPB	CPB	CPX
Variante EN 205 / EN 210	BB	X	X	X
IC 1 - Ourique / Santana da Serra	BB	X	X	X
A 11 - Braga / Vila Seca	BBd	X		X
IP 7 - Eixo N/S, Lisboa	BBd	X		X
A 7 - Fafe / Basto	BBr	X		X
EN 105 (St Tirso)	mAF	X		X
IC 2	mAF	X		
IP 8 - Grândola / Sines	mAF	X		X
IC 33 - Grândola / Sines	mBBr	X		X
EN 201	MBA BBA	X	X	X
EN 14 - Trofa / Braga	MBA BBA	X	X	X
EN 205-3 - Rendufe / Terras de Bouro	MBA BBM	X	X	X
IC 12 (Canas de Senhorim)	MBA BBM	X		
IC 1 - Ourique / Santana da Serra	MBR BBA	X	X	X
EN 370 - Avis / Arraiolos	MBR BBS	X		X

3.3.2 Veículos ligeiros

No Quadro 6 apresentam-se os parâmetros estatísticos e os níveis de ruído calculados para as velocidades de referência constantes no Quadro 4 nas secções observadas, excepto na via direita do IP7 (Eixo N/S) por falta de amostragem. Na determinação das regressões lineares entre os níveis de ruído e as velocidades foram excluídos pontos manifestamente espúrios em relação ao aspecto geral das relações. Na Figura 5 apresenta-se, a título de exemplo, uma das regressões (referente à EN 370, sentido Arraiolos – Avis).

Quadro 6 | Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados a 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h relativos aos veículos ligeiros nas secções observadas

Estadística	BB Var 205	BB IC1	BBd A11	BBd ENS-vc	BBr A7	mAF EN105	mAF IC2 /1	mAF IC2 /2	mAF IP8	mBBr IC33	MBA BBA EN201 /1	MBA BBA EN201 /2	MBA BBA EN14	MBA BBM EN205-3 /1	MBA BBM EN205-3 /2	MBA BBM IC12	MBR BBA IC1	MBR BBS EN370 /1	MBR BBS EN370 /2
Máximo	85,8	81,8	82,7	80,2	83,7	83,1	79,8	82,4	86,7	80,5	77,5	78,5	79,6	76,5	73,8	90,1	84,0	76,3	78,6
Mínimo	68,1	69,2	71,2	71,2	74,6	71,5	68,3	70,1	70,5	67,0	65,5	65,4	65,2	62,0	65,2	73,3	72,9	62,1	61,7
Média	77,2	75,3	78,0	76,4	79,1	76,4	74,7	75,4	79,0	74,7	72,5	72,4	73,1	69,0	69,5	81,3	77,9	68,7	71,3
Desvio padrão	3,27	2,24	2,07	1,59	1,88	2,11	2,18	2,41	3,00	2,45	2,28	2,63	2,61	2,76	2,04	2,20	2,48	3,10	3,54
Número de veículos	99	92	116	222	160	111	59	94	141	132	65	71	90	73	26	156	66	129	106
Declive	32,4	19,8	18,1	15,0	23,2	29,4	29,6	29,6	32,3	25,0	32,0	24,7	25,8	24,3	19,9	26,4	17,7	27,0	29,5
Ordenada na origem	14,4	36,7	40,8	46,5	32,3	21,9	20,8	22,3	17,1	26,9	15,2	27,9	26,0	25,7	32,8	27,6	43,3	19,1	15,9
R ²	0,82	0,33	0,35	0,26	0,54	0,54	0,59	0,67	0,63	0,57	0,58	0,59	0,48	0,43	0,34	0,60	0,23	0,67	0,78
LA _{max} 50	69,5	70,3	71,6	71,9	71,6	71,9	71,1	72,5	71,9	69,4	69,6	69,8	69,9	67,0	66,7	72,5	73,4	65,0	66,0
LA _{max} 80	76,1	74,4	75,3	75,0	76,3	77,9	77,2	78,6	78,5	74,5	76,1	74,9	75,2	71,9	70,8	77,9	77,0	70,6	72,1
LA _{max} 110	80,6	77,1	77,8	77,1	79,5	81,9	81,3	82,7	83,0	77,9	80,6	78,3	78,7	75,3	73,5	81,5	79,4	74,3	76,1

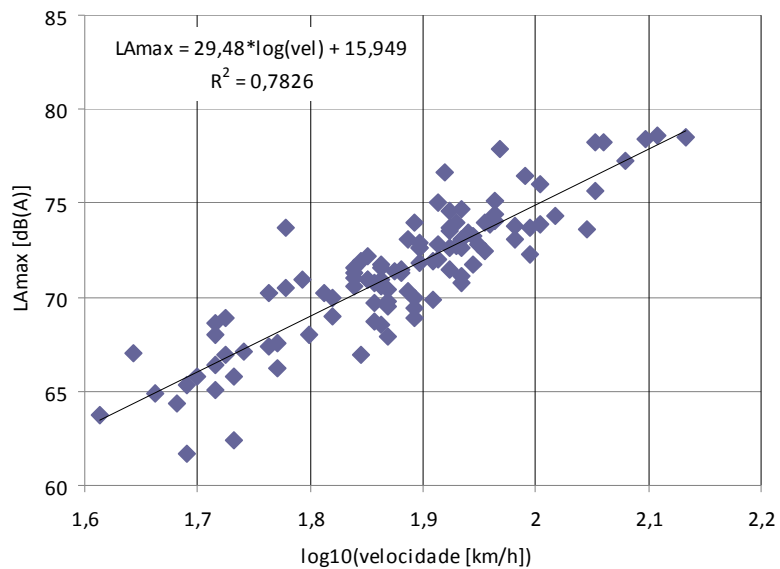


Figura 5 | Regressão entre níveis de ruído e velocidades de circulação de veículos ligeiros na EN 370, sentido Arraiolos-Avis

Na Figura 6 apresenta-se o parâmetro "declive das rectas de regressão" e nas Figuras 7, 8 e 9 o nível de ruído máximo para as velocidades de 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h, respectivamente, em cada secção observada.

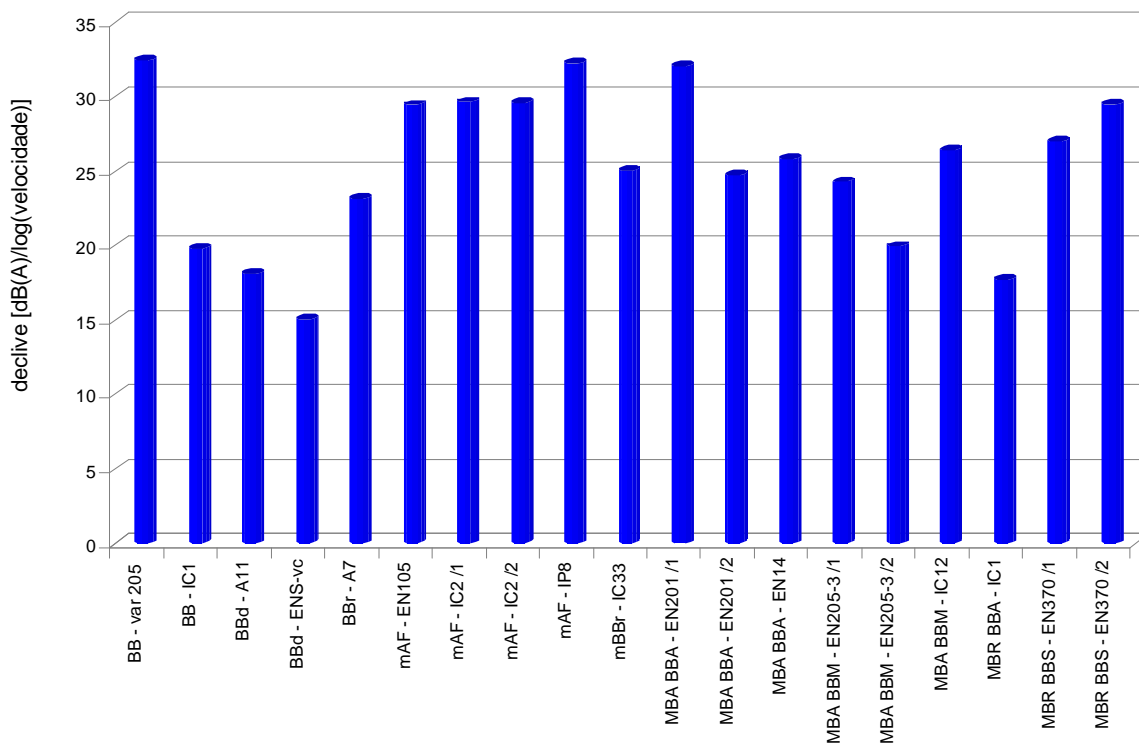


Figura 6 | Parâmetro "declive da recta de regressão" relativo aos veículos ligeiros

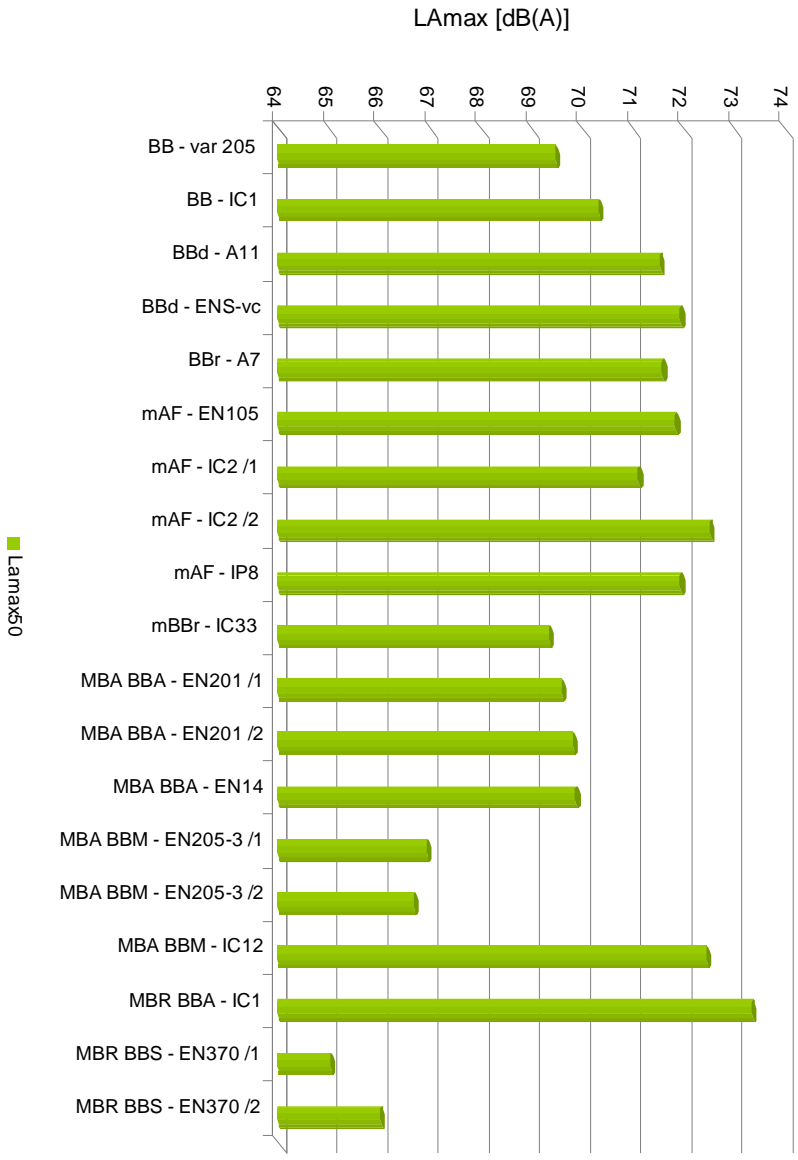


Figura 7 | Nivel de ruído máximo (L_{Amax}) para a velocidade de 50 km/h dos veículos ligeiros

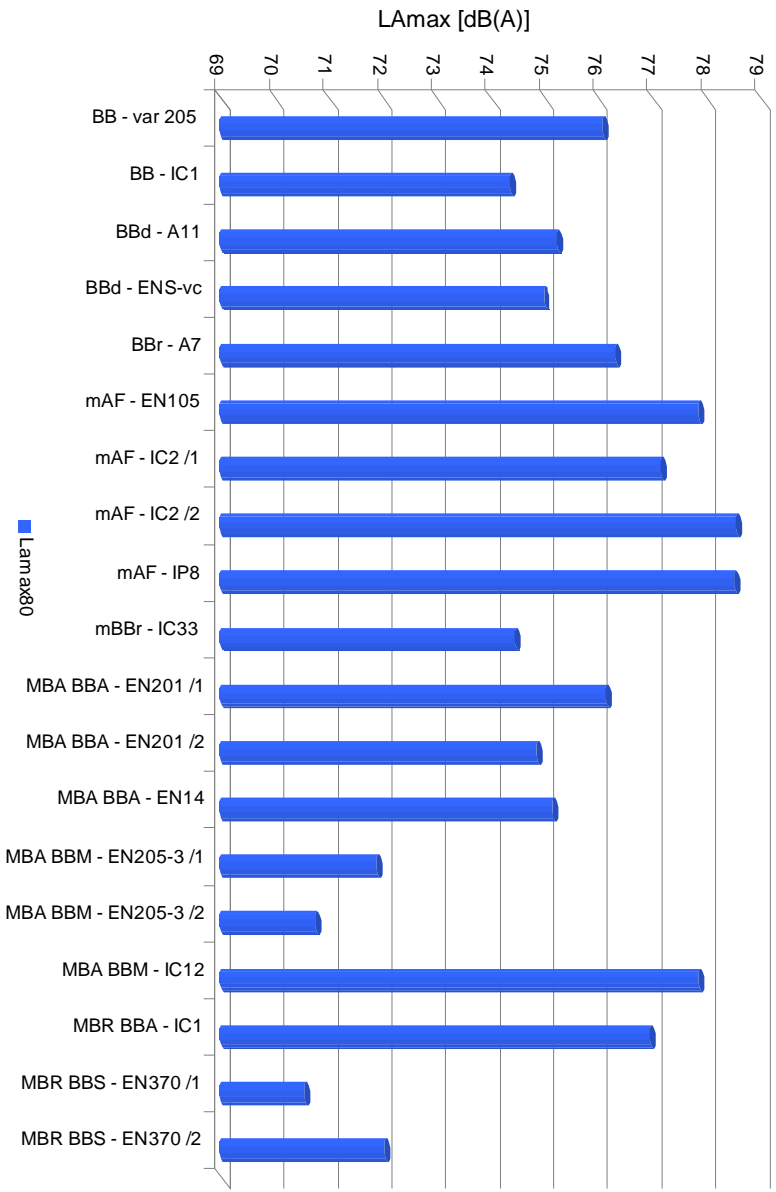


Figura 8 | Nivel de ruído máximo (L_{Amax}) para a velocidade de 80 km/h dos veículos ligeiros

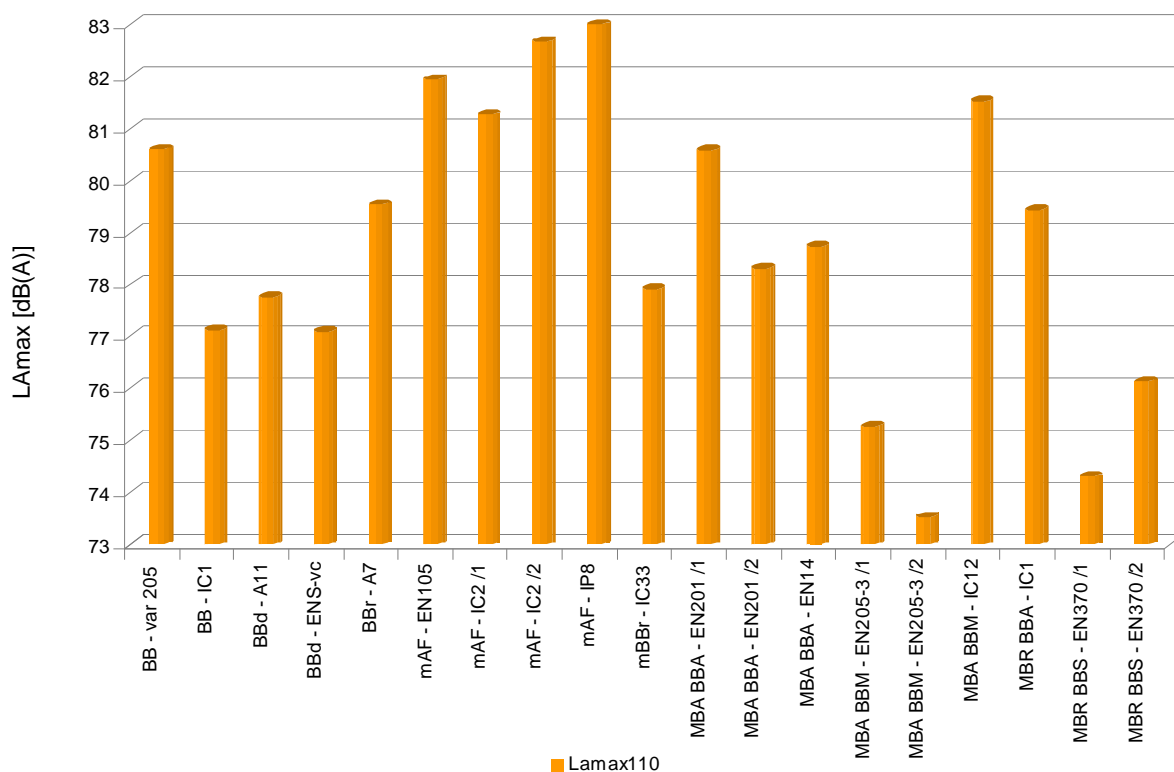


Figura 9 | Nível de ruído máximo (LA_{max}) para a velocidade de 110 km/h dos veículos ligeiros

3.3.3 Veículos pesados

O número de veículos pesados observados é, em geral, pequeno quando comparado com o número de veículos ligeiros e, sobretudo, com o número mínimo preconizado na norma — 30 para cada uma das categorias L_{2a} e L_{2b} , sob condição do somatório de ambas ser de 80 no mínimo. No que respeita à categoria L_{2a} , em apenas um dos trechos foram observados mais do que 30 veículos, e em 7 trechos foram observados entre 15 e 30 veículos. Em relação à categoria L_{2b} foi possível observar em 8 trechos mais do que 30 veículos. Conclui-se assim que para ser possível respeitar o número de veículos preconizado na norma, o tempo de permanência em cada local seria excessivamente elevado.

Nos casos em que o número de observações pode ser considerado significativo, os pares de valores observados (velocidades/nível de ruído) apresentam-se em forma de "nuvens" de pontos, que retiram significado estatístico às regressões lineares ajustadas aos pontos observados. Em alguns casos o quadrado do coeficiente de correlação do momento dos produtos de Pearson (a grandeza R^2) toma valores muito próximos de 0. A título de exemplo, apresenta-se na Figura 10 os pares de valores observados para veículos de categoria L_{2a} no IP7 – Eixo Norte-Sul, via direita. Apesar de existirem 87 medições, constata-se uma grande dispersão nos dados. Este tipo de dispersão é sistemática nas observações referentes aos veículos pesados, o que acaba por inviabilizar a realização de um tratamento de dados similar ao realizado com os dados referentes aos veículos ligeiros.

Com o objectivo de ser completo na apresentação da informação colhida, fornecendo todos os dados obtidos, apresentam-se estes dados em formato electrónico (sob a forma de folhas de cálculo) no CD-ROM anexo a este relatório. Nestes ficheiros encontram-se não apenas os dados colhidos, como também o tratamento dos dados realizado.

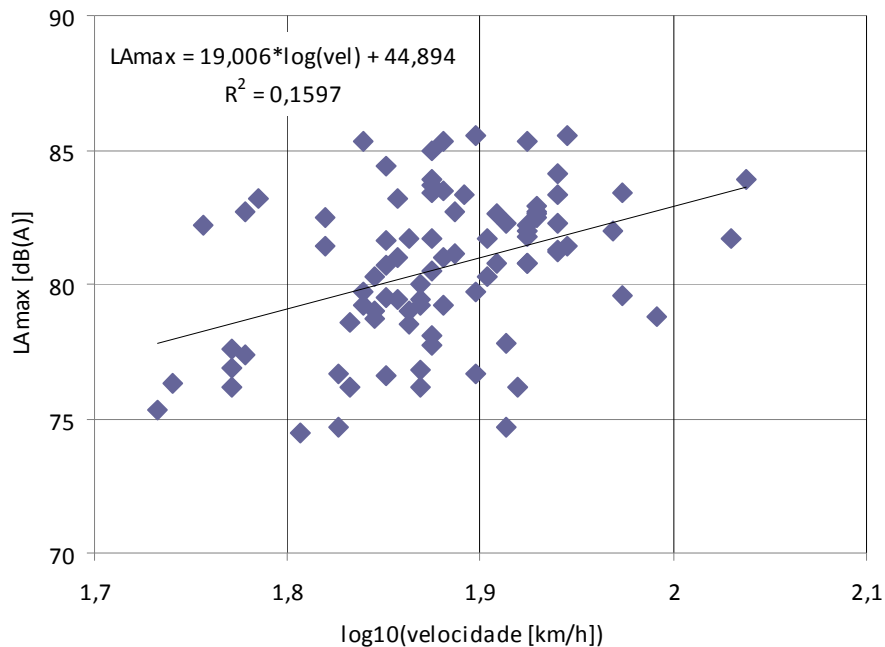


Figura 10 | Regressão entre níveis de ruído e velocidades de circulação de veículos pesados da categoria L2a no IP7 – Eixo Norte-Sul, via direita

3.4 Avaliação do ruído pelo método “Controlled Pass By” (CPB)

Para a avaliação do desempenho acústico pelo método da passagem controlada foram seleccionados 4 veículos ligeiros. Dois destes veículos foram usados em todas as secções observadas por este método. Além disso, foi ainda possível usar um veículo híbrido em 4 das 6 secções observadas.

Inicialmente, nas secções situadas no IC1, foram efectuadas 4 medições por veículo às velocidades de 50 km/h, 80 km/h, 90 km/h e 110 km/h. Nas restantes secções foram efectuadas duas medições por veículo intervaladas de 10 km/h entre os 30 km/h e os 110 km/h (sempre que a geometria da via permitisse). Esta alteração permitiu, para além de melhorar o coeficiente de correlação do momento dos produtos de Pearson, estudar o comportamento do veículo híbrido a velocidades reduzidas. O ensaio consistiu na passagem dos veículos a velocidade constante em cada faixa de rodagem, junto à qual se colocou um sonómetro nas condições anteriormente referidas e um radar para a medição da velocidade real de passagem.

Para assegurar que as medições de ruído são válidas, no decorrer dos ensaios verificou-se a velocidade do vento, a temperatura do ar e da superfície do pavimento. Assim, a velocidade do vento deve ser inferior a 5 m/s, a temperatura ambiente deve estar compreendida entre 5 e 30 °C e a temperatura

da superfície entre 5 e 50 °C [6]. Estes parâmetros foram medidos a cada passagem dos veículos, nunca tendo sido ultrapassados.

À semelhança do método SPB, foram calculados os parâmetros estatísticos que permitem determinar as rectas de regressão LA_{max} versus logaritmo decimal da velocidade, e foram estimados os níveis de ruído para as velocidades de referência indicadas no Quadro 4. A seguir são apresentados os parâmetros estatísticos correspondentes, relativos à regressão LA_{max} versus logaritmo decimal da velocidade e os níveis de ruído a cada nível de velocidade.

No Quadro 7 e no Quadro 8 apresentam-se para os veículos ligeiros e para o veículo híbrido, respectivamente, os parâmetros estatísticos e os níveis de ruído calculados às velocidades indicadas no Quadro 4 nas secções observadas. Para o veículo híbrido acrescentou-se a velocidade de 30 km/h, porque um dos objectivos era verificar o comportamento deste veículo a velocidades reduzidas.

Na Figura 11 e na Figura 12 apresenta-se o nível de ruído máximo em cada secção observada para os veículos ligeiros e para o veículo híbrido.

Com o objectivo de analisar a eventual contribuição do veículo híbrido na redução do ruído, apresenta-se na Figura 13 a diferença de nível de ruído máximo estimado.

Quadro 7 | Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados a 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h relativos aos veículos ligeiros nas secções observadas pelo método CPB

Estatística	BB var205	BB IC1	MBA BBA EN201	MBA BBA EN14	MBA BBM EN205-3	MBR BBA IC1
Máximo	80,37	82,8	80,02	80,58	73,45	83,4
Mínimo	63,57	67,2	63,27	65,48	58,73	67,3
Média	73,33	75,61	71,86	74,49	66,22	76,55
Desvio padrão	5,34	4,44	5,07	4,84	4,52	4,56
Número de veículos	30	56	73	28	24	50
Declive	29,2	30,6	28,4	26,9	21,7	31,4
Ordenada na origem	20,6	16,3	21,6	26,3	29,0	16,1
R ²	0,99	0,83	0,98	0,97	0,71	0,91
LA_{max50}	70,12	68,25	69,90	72,08	65,78	69,44
LA_{max80}	76,08	74,48	75,71	77,57	70,20	75,85
LA_{max110}	80,11	78,71	79,64	81,29	73,19	80,19

Quadro 8 | Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados a 30 km/h, 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h relativos ao veículo híbrido nas secções observadas (CPB)

Estatística	BB var205	MBA BBA EN201	MBA BBA EN14	MBA BBM EN205-3
Máximo	77,53	76,98	77,19	72,91
Mínimo	60,67	59,26	63,77	56,10
Média	71,47	68,71	72,13	65,87
Desvio padrão	5,72	5,27	4,60	5,17
Número de veículos	10	29	10	7
Declive	30,2	29,2	27,4	32,4
Ordenada na origem	16,1	17,8	23,1	9,3
R ²	1,00	0,97	1,00	0,93
LA _{max} 30	60,75	60,92	63,57	57,15
LA _{max} 50	67,45	67,40	69,65	64,34
LA _{max} 80	73,61	73,36	75,25	70,95
LA _{max} 110	77,79	77,40	79,04	75,43

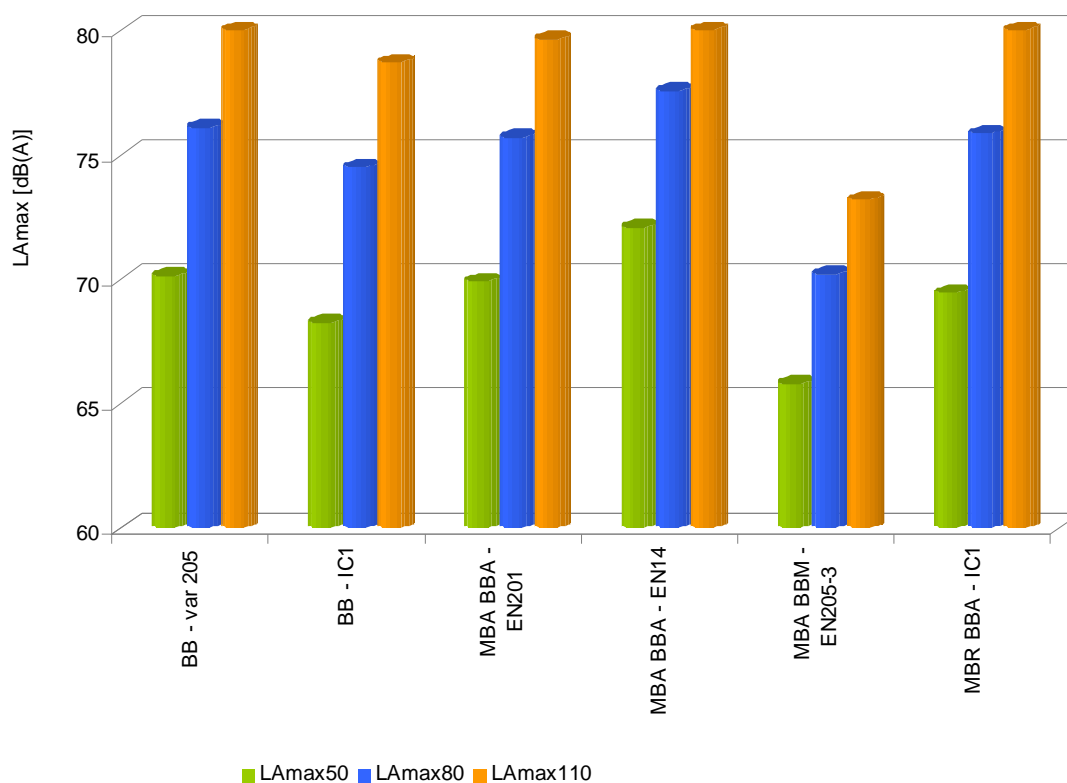


Figura 11 | Nível de ruído máximo (LA_{max}) dos veículos ligeiros pelo método CPB

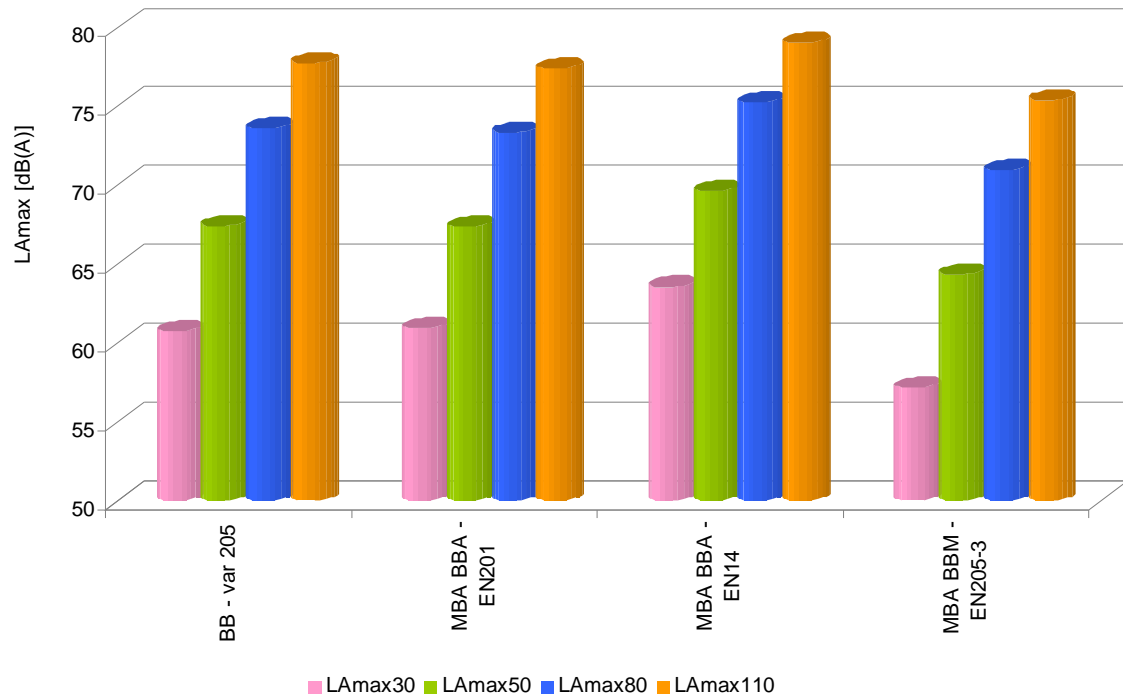


Figura 12 | Nível de ruído máximo (LA_{max}) do veículo híbrido (CPB)

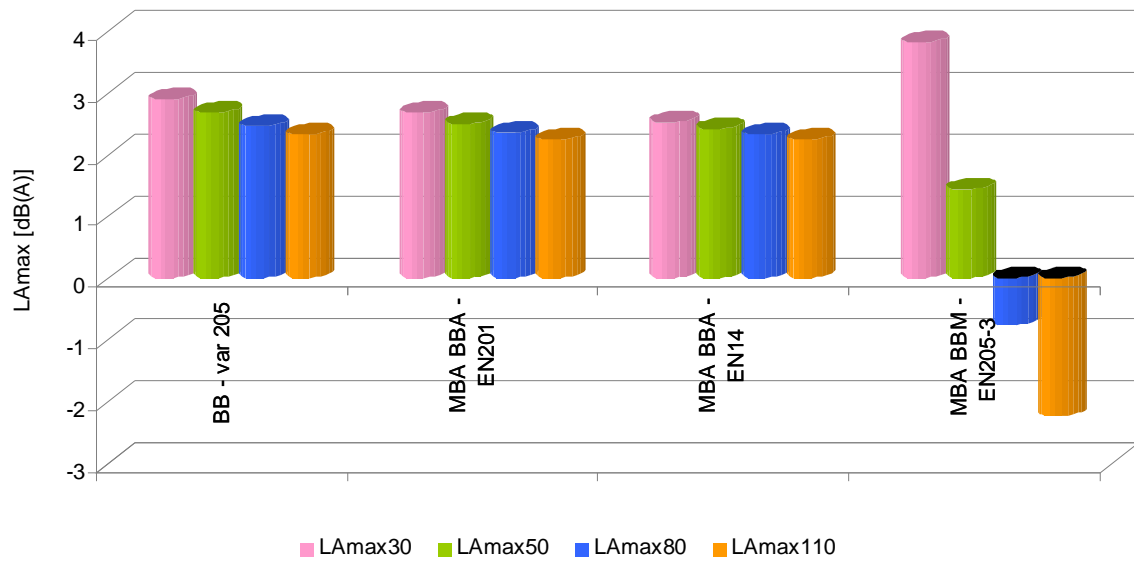


Figura 13 | Diferença de nível de ruído máximo entre os veículos ligeiros e o veículo híbrido (CPB)

3.5 Avaliação do ruído pelo método “Close Proximity” (CPX)

Para a avaliação do desempenho acústico das superfícies seleccionadas pelo método da proximidade imediata (CPX) adoptou-se o projecto de norma referido em [4]. O equipamento de medição do ruído de contacto pneu/pavimento, instalado num veículo ligeiro, pertence ao CAPS - IST. Os microfones foram colocados num suporte montado na roda traseira direita, como se vê na Figura 14.



Figura 14 | Sistema de aquisição usado no ensaio CPX

Os sinais adquiridos foram registados e processados num módulo desenvolvido especialmente para o efeito baseado na plataforma Matlab. A emissão de ruído global foi avaliada através da aplicação do método das médias temporais em secções com extensão superior a 100 m. O nível de ruído final corresponde à média aritmética dos níveis registados pelos microfones traseiro e dianteiro.

Assim, foram efectuadas duas medições às velocidades de referência de 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h em cada faixa de rodagem, totalizando 6 passagens. Na Figura 15 apresentam-se exemplos dos resultados obtidos nos ensaios efectuados para secções representativas com 200 metros de extensão. Conforme se pode observar o nível de ruído não é constante, nem sequer "praticamente constante", ao longo de troços relativamente curtos da mesma via.

No Quadro 11 apresenta-se para cada velocidade os parâmetros estatísticos: máximo, mínimo, média e desvio padrão, dos níveis de ruído medidos pelo método CPX em cada secção.

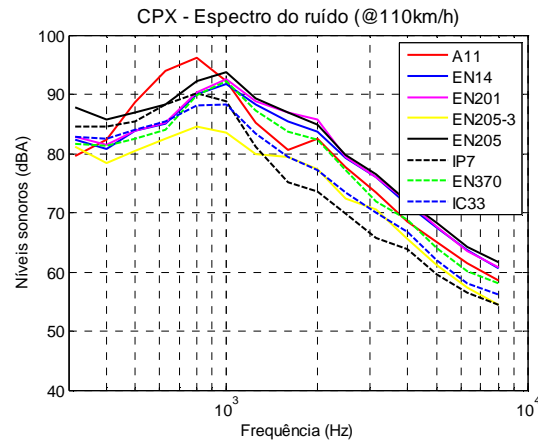
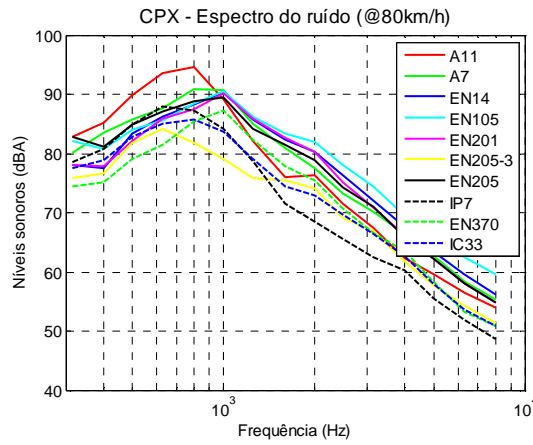
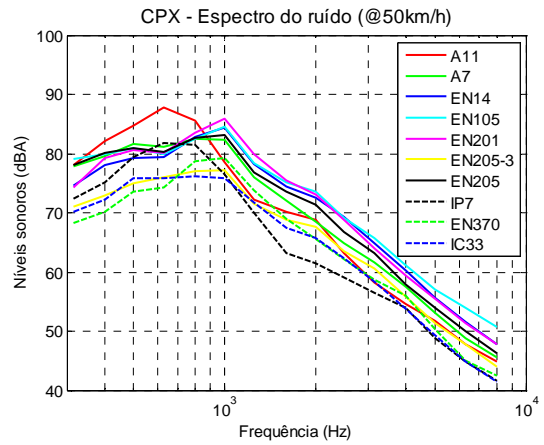
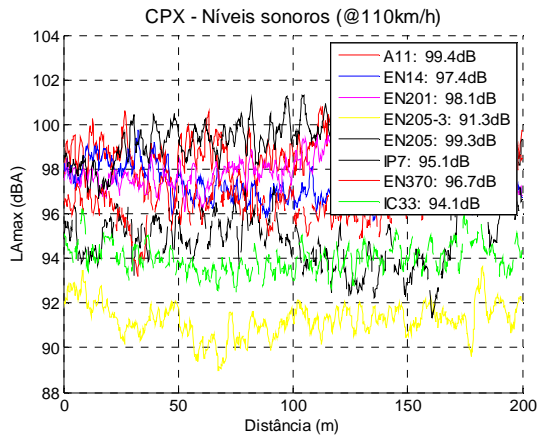
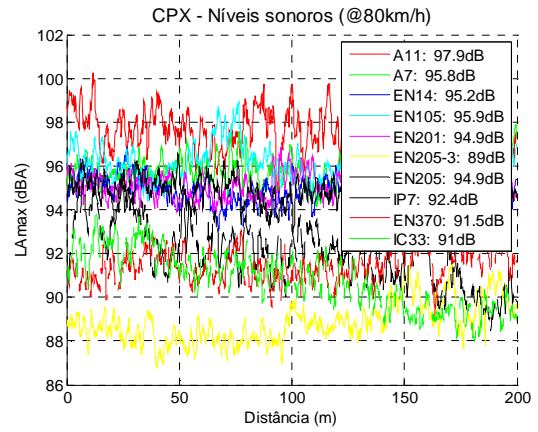
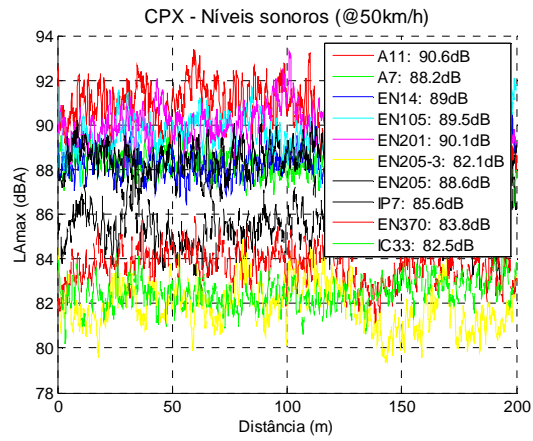


Figura 15 | Resultados obtidos no ensaio CPX

Quadro 9 | Parâmetros estatísticos e níveis de ruído calculados às velocidades de 50 km/h, 80 km/h e 110 km/h nas secções observadas pelo método CPX

Velocidade	Estatística	BB var205	BBd A11	BBd IP7	BBr A7	mAF EN105	mBr IC33	MBA BBA EN201	MBA BBA EN14	MBA BBM EN205-3	MBR BBS EN370
50 km/h	Máximo	91,2	93,4	88,4	90,2	92,3	84,7	93,3	91,9	84,9	85,9
	Mínimo	86,6	87,5	83,1	85,9	87,2	80,2	87,1	86,4	79,3	81,2
	Média	88,6	90,6	85,5	88,2	89,5	82,5	90,1	89	82,1	83,8
	Desvio padrão	0,73	1,09	0,89	0,62	0,78	0,63	0,8	0,95	1,0	0,8
80 km/h	Máximo	96,6	100,4	95,8	97,9	98,9	94,1	96,8	96,9	91,7	93,5
	Mínimo	92,8	94,9	88,5	94,1	93,7	88	93,2	93,1	86,8	88,9
	Média	94,9	97,9	92,1	95,8	95,9	90,8	94,9	95,2	89,0	91,5
	Desvio padrão	0,67	0,89	1,5	0,67	0,89	1,26	0,64	0,68	0,92	0,72
110 km/h	Máximo	101,3	102,2	99,2	-	-	96,2	100,9	99,8	93,7	98,8
	Mínimo	96,4	96,2	91,3	-	-	92,5	96,1	95,7	88,9	93,2
	Média	99,3	99,4	94,9	-	-	94,0	98,1	97,4	91,3	96,6
	Desvio padrão	0,92	1,12	1,35	-	-	0,64	0,75	0,75	0,75	0,91

4.1 Apreciação geral dos resultados

Com base nos resultados apresentados anteriormente pode-se constatar que um mesmo tipo de mistura pode apresentar comportamentos distintos do ponto de vista acústico, função das velocidades praticadas e da categoria de veículo. Esta diversidade de comportamentos observou-se quer para as misturas rugosas, quer para as misturas abertas, quer ainda para as misturas drenantes.

As secções com camadas de desgaste em micro-aglomerado betuminoso foram as que apresentaram níveis de ruído globalmente superiores.

Os níveis de ruído obtidos nas secções com camadas de desgaste em betão betuminoso drenante não foram globalmente inferiores aos obtidos em secções com outros tipos de misturas. Observou-se, no entanto, um melhor comportamento para as secções do IP7 (eixo Norte-Sul), do que para a secção da A11, ambas com betão betuminoso drenante, o que poderá ser atribuído às diferenças entre as idades das camadas ou a outros factores, relacionados por exemplo com a dimensão máxima dos agregados.

As secções com misturas betuminosas abertas ou rugosas com ligantes modificados com borracha apresentam uma gama de resultados muito variáveis, o que demonstra que a utilização de ligantes modificados com borracha, só por si, não garante um bom desempenho do ponto de vista acústico. De entre estas secções destacam-se, pelo bom desempenho acústico, as da EN 205-3, nas quais se aplicou uma mistura betuminosa aberta com média percentagem de borracha (MBA-BBM) e as da EN 370, nas quais se aplicou uma mistura betuminosa rugosa com borracha fabricada por via seca (MBR-BBS). Anota-se que, em ambos os casos, se trata de camadas de desgaste de aplicação relativamente recente.

Para os veículos pesados, cujo ruído foi avaliado apenas no caso do método SPB, verificou-se que, mesmo nas secções em que o número de veículos era suficiente para determinar a recta de regressão da variação do ruído com a velocidade, não foi possível estabelecer correlações aceitáveis. Tal pode ser atribuído ao facto de o conjunto analisado englobar veículos com características diversas, bem como ao efeito do ruído dos motores.

Finalmente, anota-se que os resultados apresentados neste estudo evidenciaram uma boa consistência entre os três métodos (SPB, CPB e CPX) utilizados neste estudo para avaliação do ruído de tráfego, para veículos ligeiros.

4.2 Influência do tipo de camada de desgaste no ruído produzido pelos veículos

Tendo em conta que o método SPB foi aquele que se utilizou em todas as secções ensaiadas, a discussão da influência do tipo de camada de desgaste no ruído produzido pelos veículos será realizada com base nos resultados obtidos por aquele método. Esta análise restringe-se ao ruído produzido pelos veículos ligeiros, uma vez que, por um lado, este tipo de veículos corresponde ao conjunto de amostras mais significativas e que, por outro, não foi possível obter boas correlações entre velocidade e nível de ruído para os veículos pesados.

A análise da influência do tipo de camada de desgaste nos resultados obtidos nos ensaios será realizada tendo em atenção os valores de L_{Amax} obtidos para as velocidades de referência de 50, 80 e 110 km/h, que se apresentam nas Figuras 7, 8 e 9.

Tal como já referido anteriormente, as camadas de desgaste em micro-aglomerado a frio foram as que exibiram um comportamento globalmente pior, para qualquer uma das velocidades de referência. Observa-se que o conjunto de pavimentos com este tipo de camada de desgaste abrange uma gama relativamente larga de macro-texturas, traduzidas por valores de ETD entre 0,55 e 0,96 mm, não se tendo encontrado qualquer tendência que permita avaliar o efeito da profundidade de textura no ruído.

As misturas betuminosas abertas com betume modificado com borracha de elevada ou de média percentagem exibem comportamentos diversos, podendo-se observar que as que exibem melhores comportamentos para qualquer das velocidades analisadas são as que possuem agregados com dimensões máximas de 10 mm. Observa-se que algumas destas camadas exibiram comportamentos piores que as camadas de betão betuminoso convencional, enquanto outras apresentaram desempenhos significativamente melhores, para qualquer das velocidades analisadas.

Excluindo as misturas com borracha, foram ensaiadas apenas duas camadas de desgaste com misturas betuminosas rugosas: um betão betuminoso rugoso com dimensão máxima do agregado de 14 mm e um micro-betão betuminoso rugoso com dimensão máxima do agregado de 10 mm, tendo-se observado que esta segunda camada apresentou num desempenho muito superior à primeira.

As camadas em betão betuminoso drenante exibiram um comportamento pior que as camadas em betão betuminoso convencional para velocidades baixas. No entanto, à medida que aumenta a velocidade, o desempenho destas camadas melhora em relação às outras misturas.

Finalmente observa-se que as camadas de desgaste que exibiram um melhor desempenho para todas as velocidades, foram as camadas da EN 205-3, em mistura betuminosa aberta com betume borracha de média percentagem (MBA-BBM) e com dimensão máxima do agregado de 10 mm, e da EN 370, em mistura betuminosa rugosa com betume borracha por via seca (MBR-BBS). Apesar de este tipo de mistura betuminosa ser promissor, do ponto de vista do ruído, não há ainda, muita experiência relativamente ao seu desempenho sob a acção do tráfego.

Face aos resultados obtidos neste estudo, não foi possível estabelecer qualquer tipo de relação directa entre a profundidade de textura superficial e o nível de ruído.

5 | CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste relatório apresentam-se os resultados obtidos na primeira fase de um estudo realizado a pedido da Estradas de Portugal SA, com o objectivo de analisar de técnicas a aplicar em camadas de desgaste dos pavimentos rodoviários, que proporcionem uma diminuição do ruído produzido pela passagem dos veículos.

Os trabalhos efectuados no âmbito desta primeira fase tiveram como objectivo a caracterização dos principais tipos de camadas de desgaste aplicados em Portugal, do ponto de vista do seu desempenho acústico. Para tal, foi seleccionado um conjunto de troços de estrada com diferentes tipos de camadas de desgaste, representativas das misturas mais utilizadas em Portugal.

Foi efectuada a caracterização da irregularidade superficial e da macro-textura superficial das secções seleccionadas, tendo-se concluído que os troços ensaiados possuem, em regra, uma boa regularidade superficial e abrangem gamas de profundidade de textura superficial representativas dos tipos de materiais estudados.

Para todas as secções seleccionadas foi efectuada a avaliação do ruído de tráfego pelo método do SPB, tendo-se efectuado complementarmente ensaios com CPX e ainda ensaios pelo método do CPB. Os resultados apresentados neste estudo evidenciaram uma boa consistência entre os três métodos utilizados (SPB, CPX e CPB).

Com base nos resultados obtidos nestes ensaios constatou-se que um mesmo tipo de mistura pode apresentar comportamentos distintos do ponto de vista acústico. Esta diversidade de comportamentos observou-se quer para as misturas rugosas quer para as misturas abertas, quer ainda para as misturas drenantes.

As secções com camadas de desgaste em micro-aglomerado betuminoso a frio foram as que apresentaram níveis de ruído globalmente superiores. Tal não significa, no entanto, que não possam existir misturas deste tipo que conduzam a camadas com bons desempenhos do ponto de vista acústico.

Os níveis de ruído obtidos nas secções com camadas de desgaste em betão betuminoso drenante não foram inferiores aos obtidos nalgumas secções com outros tipos de misturas. Observaram-se, no entanto, diferenças de comportamentos entre as secções com betão betuminoso drenante, o que poderá ser atribuído às diferenças entre as idades das camadas ou a outros factores, relacionados por exemplo com a dimensão máxima dos agregados.

As secções com misturas betuminosas abertas ou rugosas com ligantes modificados com borracha apresentam uma gama de resultados muito variáveis, o que demonstra que a utilização de ligantes modificados com borracha, só por si, não garante um bom desempenho do ponto de vista acústico. No entanto, as secções onde se obteve um melhor desempenho acústico correspondem a este tipo de misturas: uma mistura betuminosa aberta com média percentagem de borracha (MBA-BBM) e uma mistura betuminosa rugosa com betume-borracha fabricado por via seca (MBR-BBS). Anota-se que, em ambos os casos, se tratava de camadas de desgaste de aplicação relativamente recente, mas

admite-se que o bom comportamento destas secções possa ser atribuído a outros factores, por exemplo, relacionados com a dimensão máxima dos agregados.

Face aos resultados obtidos nesta primeira fase, recomenda-se que a selecção de misturas betuminosas a aplicar quando se pretende reduzir o ruído de tráfego seja efectuada criteriosamente, não se cingindo apenas a uma família de mistura betuminosa ou a um tipo de ligante, mas tendo em atenção outros factores como a dimensão máxima das partículas do agregado. Por outro lado, com base nos resultados apresentados neste estudo, ficou demonstrada a necessidade de estudar com maior profundidade a evolução do desempenho acústico das misturas ao longo do ciclo de vida dos pavimentos. Podem, no entanto, ser desde já formuladas as seguintes conclusões:

- As camadas de misturas betuminosas abertas com betume modificado com borracha e as camadas de mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha ou com outros betumes modificados podem ser eficazes para a redução do ruído a todas as velocidades, desde que possuam dimensões máximas de agregados relativamente reduzidas (10 mm).
- As camadas de betão betuminoso drenante em serviço estudadas nesta fase são eficazes na redução do ruído apenas para velocidades mais elevadas, não tendo, no entanto, exibido desempenho melhor que algumas das camadas em misturas abertas ou rugosas. Admite-se que a utilização de camadas em betão betuminoso drenante especialmente formulado para reduzir o ruído, possa ter um resultado significativamente melhor que o verificado com o tipo de camadas ensaiadas no âmbito deste estudo.
- As camadas de desgaste em microaglomerado a frio possuem geral um mau desempenho do ponto de vista do ruído.

COLABORAÇÕES

Colaboraram na realização do trabalho experimental os seguintes técnicos:

LNEC Técnico Superior José Reimão;
Coordenador Técnico Eduardo Coimbra

Universidade do Minho Assistente Técnico Carlos Palha

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Novembro de 2011

VISTOS

O Chefe do Núcleo de Infra-estruturas Rodoviárias e Aeroportuárias



Ana Cristina Freire

Eng.^a Civil, Investigadora Auxiliar do LNEC

O Director do Departamento de Transportes



António Lemonde de Macedo


Eng.^o Civil, Investigador Coordenador

O Conselho Directivo




Maria de Lurdes Antunes

AUTORIA



Maria de Lurdes Antunes

Investigadora Coordenadora do LNEC



António Sousa Coutinho

Investigador Principal com Agregação do LNEC



Elisabete Freitas

Professora Auxiliar da Universidade do Minho



Joel Paulo

Investigador do CAPS/IST

6 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EN 13036-5: *Road and airfield surface characteristics - Test methods - Part 5: Determination of longitudinal unevenness indices*
- [2] ISO 13473-1:1997. *Characterization of Pavement Texture by Use of Surface Profiles – Part 1: Determination of Mean Profile Depth.*
- [3] EN 13036-1: 2001. *Road and airfield surface characteristics — Test methods — Part 1: Measurement of pavement surface macrotexture depth using a volumetric patch technique.*
- [4] ISO CD 11819-2. *Acoustics – Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 2: The Close-Proximity Method.*
- [5] ISO 11819-1: 1997. *Measurement of the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method.*
- [6] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A., *Tyre / Road Noise Reference Book* 2002

