

CARACTERIZAÇÃO ACÚSTICA DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS E INFLUÊNCIA NA EMISSÃO SONORA

ALFREDO HERCULANO PINTO PEREIRA

Relatório de projecto submetido para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÕES

Orientador: Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho

JANEIRO DE 2010

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2009/2010 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2010.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

Aos meus Pais, principalmente a minha mãe que tornou tudo possível

O importante é nunca parar de questionar

Albert Einstein

Agradecimentos

Expresso os meus agradecimentos:

Ao meu orientador Professor Doutor António Pedro Oliveira de Carvalho pela paciência, disponibilidade e interesse durante a elaboração do relatório de projecto.

Aos colegas e amigos, pois sem o apoio e motivação provavelmente este trabalho não seria feito, principalmente a António Luís, Eduardo Afonso, Daniel Maia, Mário Ribeiro, Rita Oliveira, Isabel Silva, Melânia Santos, Clementina Mesquita, Luciano Peredo, João Rocha e Bernardino Pinto.

Resumo

O objectivo deste trabalho é ser um estudo monográfico do estado da arte, relativamente à caracterização acústica de pavimentos rodoviários e sua influência na emissão sonora.

Como a experiência portuguesa no domínio da avaliação do ruído rodoviário e o conhecimento dos factores que o determinam ainda não são suficientes para satisfazer os cada vez mais exigentes requisitos preconizados na legislação europeia, relativamente ao ruído produzido pelo tráfego rodoviário, este estudo tem como objectivo compilar e sintetizar o que está a ser feito no mundo.

Para garantir a qualidade ambiental, no que respeita ao ruído, torna-se imprescindível conhecer e determinar a eficácia das diferentes superfícies rodoviárias na redução do ruído. Para caracterizar esse ruído compilaram-se os ensaios preconizados por diversos estudos e investigações

Depois de caracterizar diversos tipos de pavimentos, incidiu-se o estudo principalmente na camada de desgaste. Procurou encontrar-se uma possível normalização para análise, da diversidade de tipos de pavimentos existentes.

Optou-se então por analisar estudos comparativos entre diversos tipos de camada de desgaste avaliando-se a eficácia na redução dos níveis sonoros em todo o mundo.

PALAVRAS-CHAVE: Acústica, Ruído, Pavimentos, Emissão Sonora, Estradas

Abstract

The goal of this work is to be a monographic study of the state of the art for characterization of the acoustic influence of pavements on road noise.

As the Portuguese experience in the evaluation of road noise and knowledge of the determining factors are not sufficient to meet the increasingly demanding requirements prescribed in European legislation in relation to noise generated by road traffic, this study aims to compile and synthesize the work that is being done in the world.

To ensure the environmental quality in respect to noise, it is essential to know and determine the effectiveness of different road surfaces to reduce noise. To characterize this noise, this work presents a compilation of the tests recommended by various studies and research.

After characterizing the various types of pavements, this study primarily focuses on the layer of wear, to be a possible standardization for analysis of the diversity of types of existing pavements.

This choice was then analyzed by comparative studies between different types of wear layer to evaluate the effectiveness in reducing noise levels in all world.

KEYWORDS: Acoustics, Noise, Pavements, Sound level, Roads

Índice Geral

Agradecimentos.....	iv
Resumo.....	vi
Abstract	viii
Índice Geral	x
Índice de Figuras	xiv
Índice de Quadros	xviii
Símbolos e Abreviaturas	xxi
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS.....	1
1.2. ESTRUTURA DO RELATÓRIO DE PROJECTO	2
2 BREVES NOÇÕES DE ACÚSTICA AMBIENTAL.....	3
3 GERAÇÃO DO RUÍDO PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO	7
4 TIPOS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS	15
4.1. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	15
4.1.1 PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS	15
4.1.2 TEXTURA DA SUPERFÍCIE DA CAMADA DE DESGASTE	19
4.1.3 TIPOS DE CAMADAS DE DESGASTE.....	22
4.1.4 TIPOS DE PAVIMENTOS DE BAIXO RUÍDO RECOMENDADOS	23
4.1.5 PAVIMENTOS SMA.....	24
4.1.6 PAVIMENTOS MODIFICADOS COM BORRACHA	25
4.1.7 PAVIMENTOS COM DUAS CAMADAS POROSAS	25
4.1.8 SUPERFÍCIES PORO-ELÁSTICAS	26

4.2 PAVIMENTOS DE BAIXO RUÍDO DO FUTURO	27
4.3 OBJECTIVOS DEFINIDOS PELA UNIÃO EUROPEIA	28
5 ENSAIOS DE ACÚSTICA.....	30
5.1 AVALIAÇÃO DO RUÍDO	30
5.2 MÉTODO ESTATÍSTICO DE PASSAGEM (SPB) / CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO NORMAL	30
5.3 MÉTODO DA ESTRITA PROXIMIDADE (CPX) / CARACTERIZAÇÃO MUITO PRÓXIMA	33
5.4 MÉTODO DA PASSAGEM CONTROLADA (CPB) / CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO CONDICIONADO	34
5.5 MÉTODO DA SUPERFÍCIE ESTENDIDA (ESM).....	35
6 RESULTADOS NÚMERICOS	37
6.1 INTRODUÇÃO AOS RESULTADOS NÚMERICOS.....	37
6.2. PAVIMENTO BMB VERSUS PAVIMENTO BAC	38
6.3. PAVIMENTO BMB VERSUS PAVIMENTO BBR	39
6.4. ESTUDO DO KANSAS SOBRE DIVERSOS PAVIMENTOS.....	41
6.5. ESTUDO PAVIMENTOS DRENANTES E CLÁSSICO PARA AS CONDIÇÕES SECO E MOLHADO.....	42
6.6. ESTUDO DA REDUÇÃO NO RUÍDO RODOVIÁRIO COM A UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE BAIXO RUÍDO.....	44
6.7. ESTUDO DA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.....	45
6.8. ESTUDO DE “EFFECTS OF DIAMOND GRINDING AND GROOVING ON TIRE/PAVEMENT NOISE”	49
6.9. ESTUDO DE DA REDUÇÃO DE RUÍDO EM SUPERFÍCIES DE BAIXO RUÍDO.....	52
6.10. ESTUDO DE “ACOUSTIC PERFORMANCE OF LOW-NOISE ROAD PAVEMENTS”	54
7 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	63

7.1. CONCLUSÕES	63
7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	64
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

Índice de Figuras

Fig. 2.1 - Parâmetros físicos da onda sonora (Santos, 2007)	4
Fig. 2.2 – Filtros A, B,C e D (Carvalho, 2006).....	6
Fig. 3.1 - Funcionamento do veículo, (adaptado de Santos, 2007)	8
Fig. 3.2 - Túnel de vento usado para determinar o ruído aerodinâmico, (<i>Ford Motor Company</i> , 2009)..	8
Fig. 3.3 - Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (Pinto, 2003).....	9
Fig. 3.4 - Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações radiais, tangenciais e da parede lateral (Santos,2007)	10
Fig. 3.5 - Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações <i>stick-snap</i> e <i>stick-slip</i> (Santos,2007)	10
Fig. 3.6 - Mecanismos aerodinâmicos do ruído pneu/pavimento (Santos, 2007).....	11
Fig. 3.7 - Mecanismos de ruído (Santos, 2007)	12
Fig. 3.8 - Ruído do motor, ruído pneu/pavimento e ruído total apresentados para veículos ligeiros e pesados, em função da velocidade (Santos, 2007)	13
Fig. 4.1 - Distribuição de tensões verticais num pavimento flexível e num pavimento rígido.(Alves, 2007).....	16
Fig. 4.2 - Conceito de pavimento perpétuo (Santos, 2007)	16
Fig. 4.3 - Microtextura e macrotextura de um pavimento (Alves, 2007)	20
Fig. 4.4 - Detalhes de superfícies com texturas positiva (a) e negativa (b) (Alves, 2007).....	21
Fig. 4.5 - Configuração de uma camada de desgaste drenante constituída por duas camadas porosas (Santos, 2007)	25
Fig. 4.6 - Pavimentos em estudo com os valores de redução de ruído (FHWA - AASHTO, 2005)	27
Fig. 4.7 - Objectivos a atingir pela União Europeia. (CALMII, 2007)	28
Fig. 4.8 - Estudos patrocinados pela União Europeia (CALMII, 2007)	29
Fig. 5.1 - Definição da zona onde não é permitida a existência de quaisquer barreiras de segurança para o ensaio (Norma ISO 11819-1:1997).....	31

Fig. 5.2 - Exigências relativamente à área que o tipo de superfície deverá abranger no ensaio (Norma ISO 11819-1:1997).....	32
Fig. 5.3 - Método estatístico de passagem (Santos, 2007)	32
Fig. 5.4 - Método da estrita proximidade (CPX) (Santos, 2007)	33
Fig. 5.5 - Método da passagem controlada (CPB) vs. estrita proximidade (CPX). (Santos, 2007)	34
Fig. 5.6 - Método do espalhamento (Santos, 2007).....	35
Fig. 6.1 - Pormenor dos pavimentos em Betuminoso Modificado com Borracha, BMB (à esquerda) e Betão Betuminoso Rugoso convencional, BBR (à direita) (Ruivo e Guerra, 2004).....	39
Fig. 6.2 - Comparação dos espectros de frequências de BMB e BBR (Ruivo e Guerra, 2004)	40
Fig. 6.3 - Espectro de frequências de algumas superfícies testadas, (HMA, Ground PCCP e Diamond Ground PCCP) (Douglas, 2005).....	41
Fig. 6.4 - Betão betuminoso corrente (Freitas <i>et al.</i> , 2006)	42
Fig. 6.5 - Betão betuminoso drenante (Freitas <i>et al.</i> , 2006)	42
Fig. 6.6 - Nível de pressão sonora versus frequência nos pavimentos, em cima: veículos ligeiros e pavimento seco e veículos ligeiros e pavimento molhado, no meio: veículos ligeiros mistos e pavimento seco e veículos ligeiros mistos e pavimento molhado, em baixo: veículos pesados e pavimento seco e veículos pesados e pavimento molhado (Freitas <i>et al.</i> , 2006)	43
Fig. 6.7- Espectro do ruído medido com o sistema CPX para diferentes tipos de pavimentos à velocidade de 80 km/h (Freitas, <i>et al.</i> , 2006).....	45
Fig. 6.8 - Nível máximo de ruído a 50 km/h (CPB) (Freitas <i>et al.</i> , 2008).....	47
Fig. 6.9 - Nível máximo de ruído a 70 km/h (CPB) (Freitas <i>et al.</i> , 2008).....	47
Fig. 6.10 - Nível máximo de ruído a 90 km/h (CPB) (Freitas <i>et al.</i> , 2008).....	48
Fig. 6.11 - Nível máximo de ruído (CPX), (Freitas, <i>et al.</i> , 2008).....	49
Fig. 6.12 - Superfícies ,linha de cima da esquerda para a direita: <i>Conventional grind</i> ; <i>Double chopper blade</i> ; <i>Triple chopper blade</i> . linha do meio da esquerda para a direita: <i>Blank</i> ; <i>Blank with grooves</i> ; <i>Full grind</i> . Linha de baixo : <i>Full grind with grooves</i> . (Dare <i>et al.</i> , 2007)	51

Fig. 6.13 - Resultados finais do nível de ruído das superfícies <i>diamond grinding</i> e <i>grooving</i> com dois tipos de pneus e a média entre nível de ruído dos dois tipos de pneus (Dare et al. , 2007)	51
Fig. 6.14 - Vista de cima das superfícies <i>two layer drainage pavement</i> , <i>one layer drainage pavement</i> , <i>porous elastic pavement</i> e <i>dense asphalt pavement</i> , testadas no Japão (ECE, 2007).....	55
Fig. 6.15 - Valores finais a velocidade constante de 60 km/h, das superfícies <i>two layer drainage pavement</i> , <i>one layer drainage pavement</i> , <i>porous elastic pavement</i> e <i>dense asphalt pavement</i> , testadas no Japão (ECE, 2007)	53

Índice de Quadros

Quadro 4.1 - Características de pavimentos flexíveis (Branco <i>et al.</i> , 2006).....	14
Quadro 4.2 - Características de pavimento semi-rígido (Branco <i>et al.</i> , 2006).....	15
Quadro 4.2 - Características de pavimento rígido (Branco <i>et al.</i> , 2006).....	16
Quadro 4.3 - Dimensões de textura para um pavimento (Alves, 2007).....	17
Quadro 5.1 - quadro comparativo das vantagens/desvantagens dos métodos de avaliação de ruído de pavimentos rodoviários	36
Quadro 6.1 - Níveis sonoros dos pavimentos BMB e BAC (Ruivo e Guerra, 2004).....	38
Quadro 6.2 - Níveis sonoros dos pavimentos BMB e BBR (Ruivo e Guerra, 2004).....	40
Quadro 6.3 - Características das camadas superficiais do betuminoso corrente e betuminoso drenante (Freitas <i>et al.</i> , 2006).....	42
Quadro 6.4 - Quadro final de resultados entre o betuminoso corrente e betuminoso drenante, seco e molhado (Freitas <i>et al.</i> , 2006)	43
Quadro 6.5 - Propriedades das misturas MA1, MA2 e BB (Freitas, <i>et al.</i> , 2006).....	44
Quadro 6.6 - Nível de ruído para as velocidades de referência (Freitas, <i>et al.</i> , 2006).....	45
Quadro 6.7 - Propriedades das misturas (Freitas, <i>et al.</i> , 2008).....	46
Quadro 6.8 - Sequência da utilização das lâminas (Dare et al , 2007).....	50
Quadro 6.9 - Características das superfícies <i>two layer drainage pavement</i> , <i>one layer drainage pavement</i> , <i>porous elastic pavement</i> e <i>dense asphalt pavement</i> , testadas no Japão (ECE, 2007).....	52
Quadro 6.10 - Abreviaturas usadas para os tipos de pavimentos em estudo (Andersen, 2005)	54
Quadro 6.11 - Níveis de ruído para velocidades 50, 80 e 110 km/h (Andersen, 2005).....	55
Quadro 6.12 - Níveis de ruído para velocidades 50, 70 e 85 km/h (Andersen, 2005).....	56
Quadro 6.13 - Níveis de ruído para velocidades 50, 70 e 85 km/h (Andersen, 2005).....	57
Quadro 6.14 - Níveis de ruído para <i>dense asphalt concrete</i> (DAC) (Andersen, 2005)	58
Quadro 6.15 - Níveis de ruído para SMA (Andersen, 2005).....	58

Quadro 6.16 - Níveis de ruído para <i>Guss asphalt</i> (MA) (Andersen, 2005).....	59
Quadro 6.17 - Níveis de ruído para <i>Hot rolled asphalt</i> (HRA) (Andersen, 2005)	59
Quadro 6.18 - Níveis de ruído para <i>surface dressing</i> (SD) (Andersen, 2005).....	59
Quadro 6.19 - Níveis de ruído para <i>slurry seal</i> (Andersen, 2005)	60
Quadro 6.20 - Níveis de ruído para <i>porous pavement</i> (PAC) (Andersen, 2005).....	60
Quadro 6.21 - Níveis de ruído para <i>two layer porous pavement</i> (DPAC) (Andersen, 2005).	60
Quadro 6.22 - Níveis de ruído para <i>cement concrete including burlap type</i> (CCb) (Andersen, 2005).....	61
Quadro 6.23 - Níveis de ruído para <i>porous cement concrete</i> (PCC) (Andersen, 2005).....	61
Quadro 6.24 - Níveis de ruído para <i>paving stones</i> (Andersen, 2005)	61

Símbolos e Abreviaturas

BAC - Betão Armado Contínuo

BB - Betão Betuminoso

BBR - Betão Betuminoso Rugoso convencional

BCC - Brushed Cement Concrete

BDr - Betão betuminoso drenante

BMB - Betuminoso Modificado com Borracha

c - Velocidade do som

CCb - *Burlap Textured Concrete* (Longitudinally structured)

CPB - Método da passagem controlada

CPX - Método da estrada proximidade

d - Distância directa entre o emissor e o receptor

DAC - *Dense asphalt Concrete*

dB - Decibéis

DDAP - Camada drenante dupla

DPAC - *Doble Porous Asphalt Concret*

EACC - *Exposed aggregate concrete*

DL – Decreto Lei

f - Frequência

h - Hora

HMA - *Hot Mix Asphalt*

hr - Altura real do receptor

HRA - *Hot Rolled Asphalt*

hs - Altura real do emissor

Hz - Hertz

ISO - *International Organization for Standardization*

km - Quilometro

LAeq - Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A

m - Metro

MBR Microbetões betuminosos rugosos

MBR-BMB Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha

NF - Norma Francesa

p - Pressão sonora instantânea

PAC - *Single Poured Asphalt Concret* ou Betão betuminoso poroso

PCC - *Porous Cement Concrete*

PCCP - *Portland Cement Concrete Pavement*

PERS - Camadas poro-elásticas

po - Pressão sonora de referência

r - Distância entre fonte do ruído e o receptor

rref - Distância de referência

s - Segundo

SD - *Surface dressings*

SILVIA - *SilendaVia (Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control)*

SMA - *Stone mastic asphalt*

SPB - Método estatístico de passagem

Stick-Slip - Adere/Desliza

Stick-Snap - Adere/Descola

t - Período

TSF - *Thin layers*

UE - União Europeia

zr - Altura equivalente do receptor

zs - Altura equivalente do emissor

λ - Comprimento de onda

μPa - Micro-pascais

1.

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

A partir de meados do século XX a rede rodoviária mundial sofreu uma enorme evolução, quer quanto à sua extensão quer quanto ao volume de tráfego, com consequências para as populações, umas benéficas outras prejudiciais. Em Portugal a maior evolução recente da rede rodoviária verificou-se a partir de 1985 com a definição do plano Rodoviário Nacional 85 (DL 380/85) e com a adesão à Comunidade Económica Europeia (CEE) em 1985 e posteriormente com o plano Rodoviário Nacional 2000 (DL 222/98), consequência de um maior desenvolvimento económico e um apoio comunitário para infra-estruturas, produzindo os benefícios e os prejuízos inerentes a essa evolução.

A crescente preocupação com a qualidade de vida das populações, impõe que o Ambiente seja de importância fulcral, sendo assim exige-se aos pavimentos rodoviários melhores qualidades funcionais incluindo o acústico.

Para o presente estudo interessa analisar e caracterizar os tipos de pavimentos rodoviários sob o ponto de vista da sua contribuição para a emissão sonora.

Baseado na pesquisa e análise documental pretende-se saber o estado da arte dos pavimentos rodoviários em relação à acústica. Esse conhecimento é necessário para a correcção dos níveis de ruído, diminuindo a poluição sonora, indo ao encontro da recente legislação comunitária e nacional, consequência dos estudos que provam os efeitos negativos do ruído sobre a população.

Neste relatório, analisam-se algumas das investigações e dos resultados obtidos a nível nacional e internacional, para uma melhoria de desempenho acústico dos pavimentos rodoviários.

1.2. ESTRUTURA DO RELATÓRIO DE PROJECTO

Para além deste capítulo, este relatório encontra-se estruturado da seguinte forma:

No capítulo dois, abordam-se algumas noções de acústica ambiental, nomeadamente nível de pressão sonora e filtros utilizados para ponderar a forma como o ouvido humano capta o som;

Como é produzido o ruído pelo tráfego rodoviário, principalmente o ruído de interacção pneu/pavimento, é tratado no capítulo três.

Os principais tipos de pavimentos e características, são abordados no capítulo quatro;

No capítulo cinco referem-se os ensaios de determinação do ruído de interacção pneu/pavimento, preconizados pelos grupos de trabalho da União Europeia.

A comparação, através de estudos de ensaios entre os diversos tipos de camadas de desgaste é tratada no capítulo seis.

No capítulo sete abordam-se as conclusões e os desenvolvimentos futuros deste relatório.

No final deste encontram-se as referências bibliográficas citadas ao longo deste trabalho

2.

BREVES NOÇÕES DE ACÚSTICA AMBIENTAL

As vibrações transmitidas no ar produzem uma variação de pressão, gerando uma onda sonora que pode ser detectada pelo ouvido humano.

A onda sonora ou som produz uma sensação de audição agradável ou desagradável. O ruído (Carvalho, 2006) é, por sua vez, um “som” desagradável ou sem significado informativo, que causa incomodidade nos receptores, produzindo nestes reacções adversas.

A percepção do som pelo ouvido humano é complexa, dependendo da sua fisiologia, da capacidade do cérebro processar a informação que recebe, da resposta deste face à sensação a que está a ser submetido, do ambiente onde se insere o receptor e dos mecanismos de geração e de propagação do som.

A medição do ruído e a avaliação da resposta do receptor, ou seja da incomodidade, apoiam-se em parâmetros físicos que permitem a definição de escalas de ruído, que por sua vez, estabelecem indicadores de ruído.

Sendo a Acústica a ciência que analisa a produção, o controlo, a transmissão e a recepção do som bem como os efeitos do ruído no fenómeno da audição, apresentam-se alguns conceitos utilizados em acústica ambiental.

As ondas sonoras produzidas pelos corpos em vibração podem ser completamente caracterizadas (Santos, 2007) a partir de três parâmetros: a amplitude, o comprimento de onda e o período (Fig. 2.1).



Fig. 2.1- Parâmetros físicos da onda sonora (Santos, 2007)

A amplitude (A) corresponde à pressão máxima ou mínima produzida pela vibração, o comprimento de onda (λ) corresponde à distância entre cristas sucessivas e o período (t) corresponde ao tempo entre esses picos.

O comprimento de onda é proporcional ao inverso da frequência de um som e é dado pela equação:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

em que:

λ é o comprimento de onda (m);

c é a velocidade do som (≈ 344 m/s);

f é a frequência (Hz ou ciclos/s).

A unidade utilizada para medir a frequência da onda sonora é o hertz (Hz), que corresponde à frequência de um som que executa uma vibração completa ou ciclo, por segundo.

A intensidade do som ou ruído está directamente relacionada com a amplitude das flutuações de pressão transmitidas através do ar e que chegam ao ouvido. A resposta da audição humana não é linear. A unidade usada para descrever as flutuações da pressão sonora é o decibel, geralmente abreviado pela nomenclatura dB. O nível de pressão sonora L_p é calculado pela equação:

$$L_p = 10 \log_{10} \frac{p^2}{p_0^2}$$

Em que:

L_p representa o nível de pressão sonora (dB);

p a pressão sonora (Pa);

p_0 a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa = 20 μ Pa).

Um ouvido jovem saudável normal pode distinguir uma mudança de sonoridade geralmente superior a 3 dB. Uma mudança de 10 dB (10 vezes as flutuações da pressão) é geralmente considerada uma duplicação ou uma redução para metade do nível do som.

O ouvido detecta também uma larga escala de frequências, assim, o ouvido humano normal, saudável, pode ouvir de 20 hertz a 20 quilo hertz (kHz).

Tendo em conta o ruído produzido pelo tráfego, isto significa que terá que ocorrer uma mudança significativa nas suas características, para que os indivíduos consigam distinguir objectivamente uma mudança nos níveis de ruído. Por exemplo, quando o volume de tráfego diminui para metade, o nível de pressão sonora poderá diminuir em 3 dB. Quando uma pessoa sente, subjectivamente, que há uma redução de 50% do ruído, significa que o nível de pressão sonora terá diminuído aproximadamente 10 dB, o que seria equivalente a uma redução do tráfego em 90%.

Os sistemas auditivos não ouvem todas as frequências da mesma forma. O ouvido humano não responde muito bem às frequências baixas (≤ 250 hertz) ou às mais altas (superiores a 10 000 hertz). Em vez de especificar a intensidade de cada frequência para descrever completamente o ruído, usam-se geralmente escalas de frequências ou esquemas gerais de ponderação para a escala total de frequências. Os esquemas gerais de ponderação aproximam-se geralmente mais da forma como o ouvido capta o som, considerando todas as frequências audíveis.

Quando se descreve escalas de frequências, usam-se geralmente bandas de oitava. No caso do estudo do ruído produzido pelo tráfego exige-se normalmente o uso de bandas de 1/3 de oitava, para se poder distinguir a influência dos diferentes mecanismos que interferem com a produção do ruído. Dado que uma análise detalhada é muito trabalhosa separam-se os ruídos em zonas ou bandas de frequência correspondentes a intervalos de frequência de certa dimensão normalizada:

- Bandas de 1 oitava quando $f_{\text{superior}} / f_{\text{inferior}} = 2^1$;
- Bandas de 1/3 de oitava quando $f_{\text{superior}} / f_{\text{inferior}} = 2^{1/3}$.

Os intervalos de 1 oitava normalizados no domínio do audível são aqueles centrados em: **16, 31, 63, 125, 250, 500, 1.000, 2.000, 4.000, 8.000 e 16.000 Hz.**

Os intervalos de terço de oitava normalizados no domínio do audível são aqueles centrados em: **16, 20, 25, 31, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000, 2.500, 3.150, 4.000, 5.000, 6.300, 8.000, 10.000, 12.500 e 16.000 Hz.**

Os sonómetros incorporam malhas de ponderação electrónicas que se aproximam da forma como o ouvido humano capta o som. Foram desenvolvidas quatro malhas que são

internacionalmente reconhecidas. Os valores das medições feitas com o emprego das malhas filtrantes A, B, C, e D respectivamente, em dB(A), dB(B), dB(C) e dB(D), conforme a fig. 2.2. Deve referir-se que o dB(A) se utiliza com generalidade para quantificar o ruído de tráfego rodoviário, ruído industrial, etc..

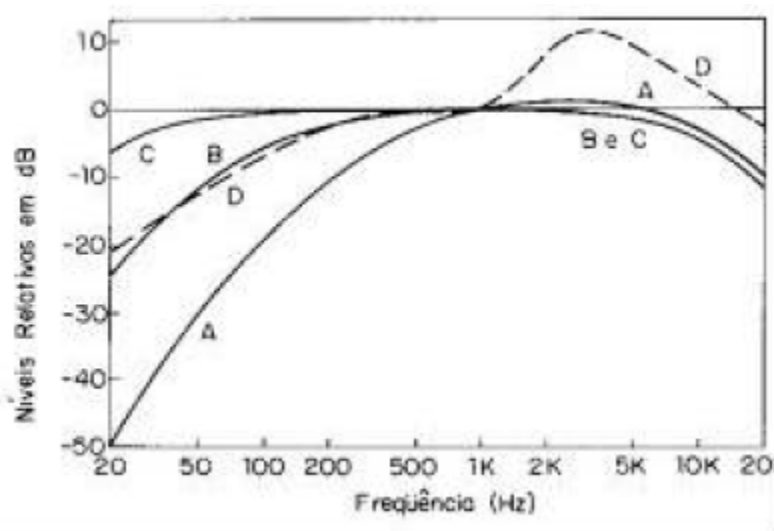


Fig. 2.2- Filtros A;B;C e D (Carvalho, 2006)

Com o objectivo de avaliar o impacto do ruído ambiental sobre as comunidades, incluindo o ruído rodoviário, a União Europeia (UE) impõe dois indicadores *Lden* e *Lnocturno* para utilização em toda a Europa. Ambos os indicadores de ruído recorrem à escala de ruído LAeq, como base, mas incluem factores adicionais relativos ao período do dia e à duração da exposição.

O indicador de ruído preconizado é o ruído diurno-entardecer-nocturno (*Lden*) sendo definido, para as condições portuguesas, no DL 9/2007.

3.

GERAÇÃO DO RUÍDO PELO TRÁFEGO RODOVIÁRIO

A redução do ruído originado pelo tráfego rodoviário pode ser obtida de três modos, designadamente actuando na fonte sonora (ruído do motor, ruído da interacção pneu/pavimento, e ruído aerodinâmico), nos locais de recepção (isolamento de fachadas dos edifícios com ocupação sensível) e no percurso de propagação do ruído (por exemplo, edificação de barreiras acústicas).

No ruído gerado pelo tráfego rodoviário, é frequente considerar-se que este advém de três tipos de fontes, o ruído originado pelo próprio funcionamento do veículo, o ruído da interacção pneu/pavimento e o ruído aerodinâmico (Fig. 3.1).

O ruído do motor (unidade de potência), o ruído pneu/pavimento e o ruído da turbulência do ar oferecem contributos diferentes relativamente à emissão de ruído global, a velocidades diferentes.

No ruído gerado pelo próprio veículo, às vezes denominado como ruído da unidade de potência, intervêm os elementos vibrantes que participam na propulsão, tais como o motor, a transmissão, os travões, o escape, a suspensão, etc..

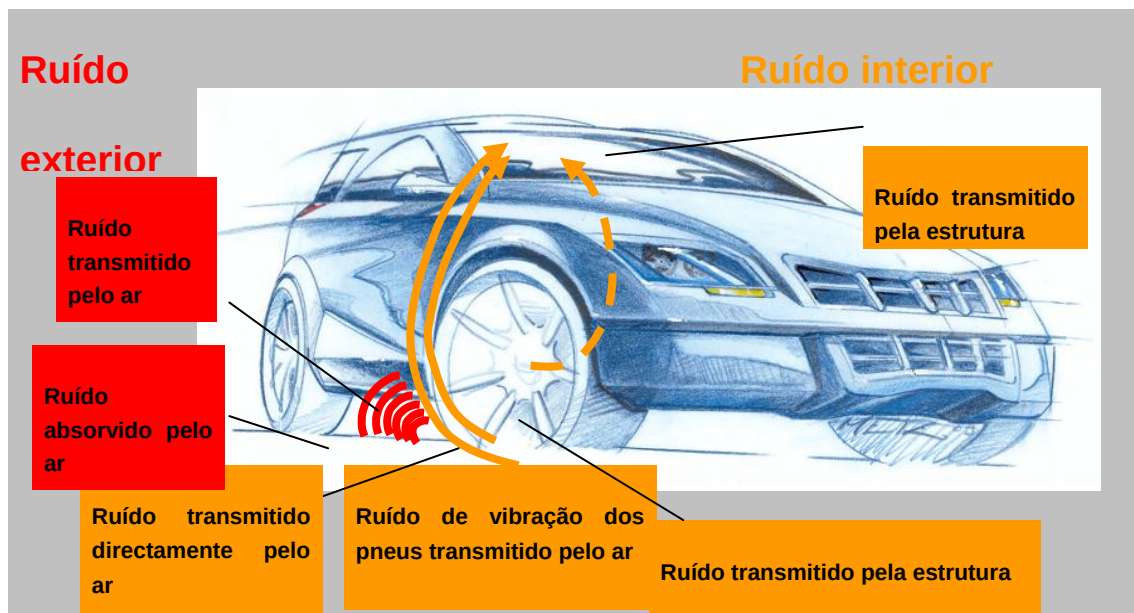


Fig. 3.1 - Funcionamento do veículo, (adaptado de Santos, 2007)

O ruído aerodinâmico tem origem na interacção entre a carroçaria do veículo e o ar, pelo que, depende fortemente da forma da carroçaria e aumenta com a velocidade de circulação do veículo. Este mecanismo geralmente é estudado, pela indústria automóvel, num túnel de vento (Fig. 3.2) de modo a avaliar esta fonte de ruído.

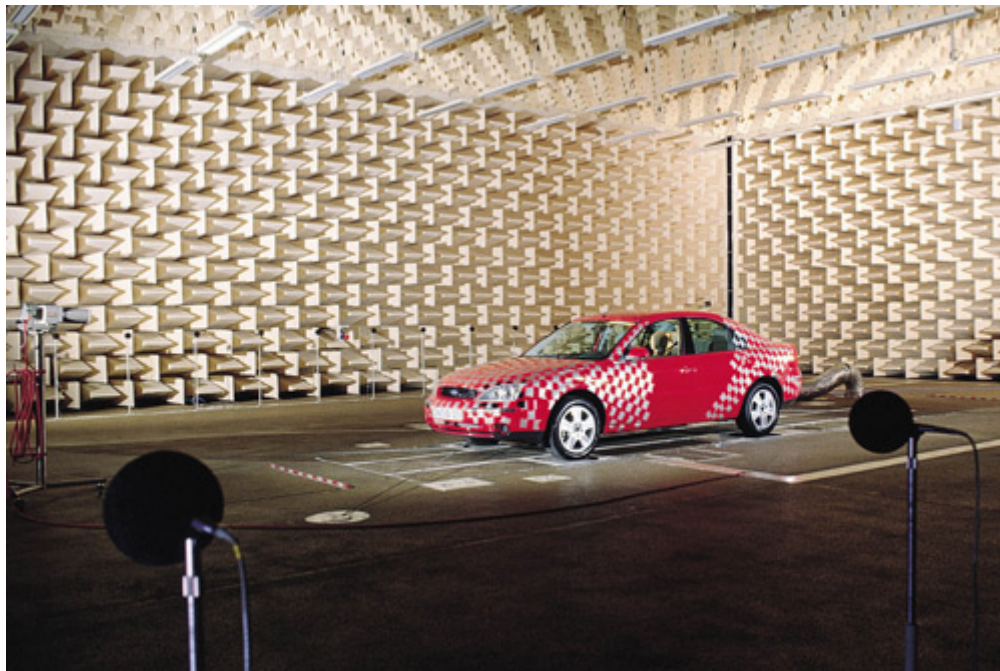


Fig. 3.2 – Túnel de vento usado para determinar o ruído aerodinâmico, (Ford Motor Company, 2009)

Os mecanismos de geração do ruído pneu /pavimento, têm sido alvo de muitas pesquisas. Em geral, esses mecanismos podem ser divididos em dois tipos de origem:

- a) Mecânicos;
- b) Aerodinâmicos.

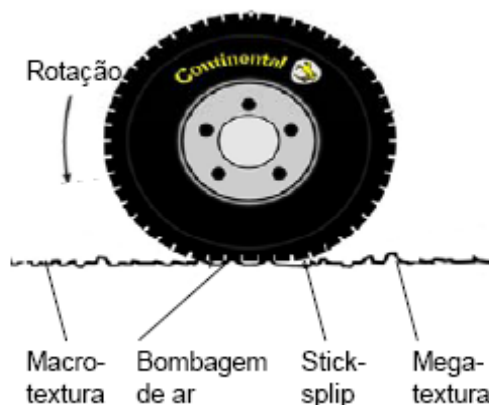


Fig. 3.3 - Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (Pinto, 2003)

Contudo, o ruído da interação pneu/pavimento (Fig. 3.3) é um fenómeno complicado visto que há muitos mecanismos de emissão, sendo que a sua contribuição para o ruído global pneu/pavimento depende de muitos factores tais como: o modelo e idade do veículo, o peso do eixo, a pressão do pneu, tipo de pneu (pneu de Verão/Inverno, pneu ranhurado/dentado), tamanho do pneu, temperatura do pneu, textura e material do pneu e superfície da estrada, qualidade e temperatura, assim como da velocidade do veículo.

Um dos mecanismos (Santos, 2007) é o mecanismo de geração mecânica que é dividido em:

- vibrações radiais e tangenciais do pneu;
- vibrações da parede lateral;
- vibrações do tipo adere/desliza – na terminologia anglo-saxónica *stick-slip*;
- vibrações do tipo adere/descola – na terminologia anglo-saxónica *stick-snap*.

As vibrações radiais da circunferência do pneu e dos elementos do perfil são activadas pelos elementos de rugosidade da estrada que deformam o piso do pneu. As vibrações tangenciais são excitadas por forças tangenciais no ponto de contacto.

As vibrações do pneu, quando criadas, têm uma forma complexa nas direcções radiais, tangenciais e axiais. As vibrações do piso do pneu são transportadas para a parede lateral que actua como “placa de som” e emite o som. Na Fig. 3.4 são ilustrados estes mecanismos.

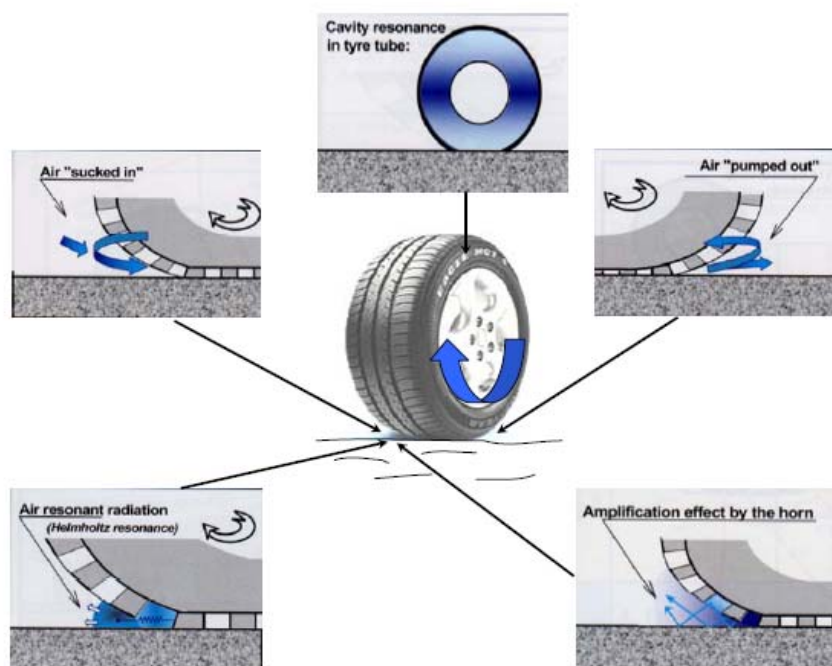


Fig. 3.4 - Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações radiais, tangenciais e da parede lateral (Santos,2007)

As vibrações *stick-slip* resultam do fenómeno de aderência/deslize que ocorre quando os materiais apresentam um reduzido atrito, com um aumento da sua velocidade relativa. Assim, os blocos do piso do pneu alternadamente “aderem” e “deslizam” relativamente à superfície da estrada. Este mecanismo está normalmente associado a situações em que forças tangenciais relativamente elevadas são aplicadas ao pneu.

O *stick-snap* ocorre quando a superfície do piso do pneu se torna aderente e a superfície de estrada está muito limpa. A força adesiva é aumentada, o que conduz a um aumento da excitação na borda traseira das marcas do pneu (Fig. 3.5).

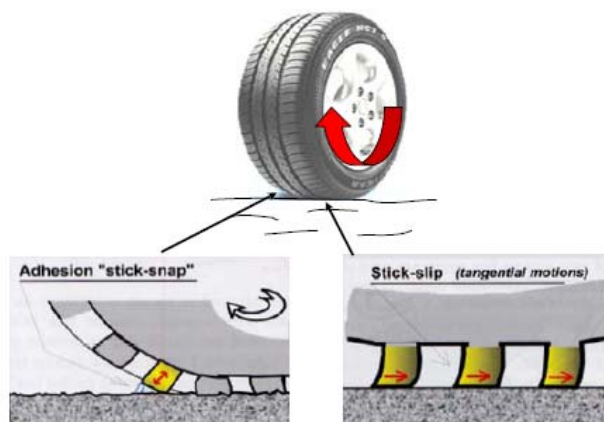


Fig. 3.5 - Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações *stick-snap* e *stick-slip* (Santos,2007)

Os mecanismos de geração aerodinâmica (Santos, 2007) são classificados em:

- Ressonância da cavidade no tubo do pneu;
- Bombeamento do ar;
- Radiação da ressonância de ar;
- Ressonância tubular.

As ressonâncias na cavidade interna do conjunto roda-pneu contribuem para o ruído gerado pelos pneus. Estas ressonâncias são muito visíveis em descontinuidades mas não para um pneu em circulação livre.

O bombeamento do ar é traduzido pela compressão de ar e rápida expansão entre a estrada e o piso do pneu, à medida que o ar é forçado para fora.

A ressonância de *Helmholtz* pode ocorrer na extremidade traseira do pneu. A cavidade para o ressoador de *Helmholtz* é formada pelo sulco que liberta o contacto com a superfície de estrada e funciona como uma mola. O ar existente entre o piso e a superfície da estrada é a garganta do ressoador e actua como uma massa (Fig. 3.6).

Cada perfil de piso, em contacto com uma superfície de estrada bastante lisa, constitui um sistema de ressoadores tubulares. As suas frequências de ressonância dependem das propriedades geométricas, mas não da velocidade de rotação do veículo

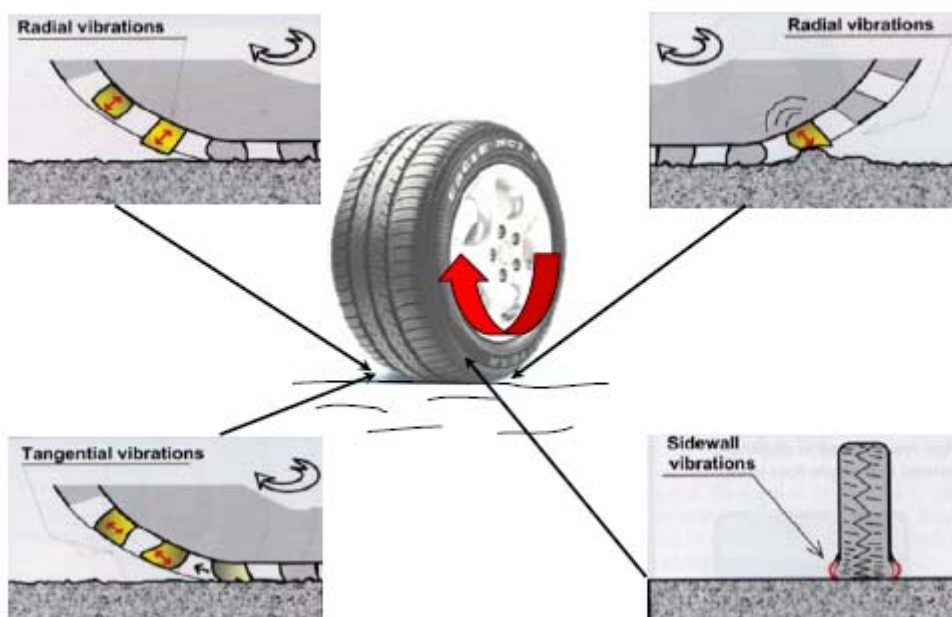


Fig. 3.6 - Mecanismos aerodinâmicos do ruído pneu/pavimento (Santos, 2007)

Os principais componentes, a vibração do pneu e a ressonância do ar, causam a emissão de diferentes frequências, agrupando-se em duas grandes categorias – altas e baixas frequências. O limite entre as duas categorias de frequência, depende do tipo de pneu e da superfície de estrada. Este limite compreende um valor entre, aproximadamente, 800 a 1000 Hz para pneus de veículos ligeiros em pavimentos em betão betuminoso com rugosidade “normal”. Os ruídos de pneu de baixa frequência são gerados quando o atrito pneu/pavimento activa a estrutura do pneu mecanicamente, à medida que este roda sobre a superfície. A excitação ocorre na maior parte na direcção radial, mas a frequências inferiores a 200 Hz (Branco *et al.*, 2006).

Na Fig. 3.7 estão esquematizados dois regimes básicos de frequência, de acordo com as definições anteriormente descritas. A vibração da parede lateral, que é induzida pela textura, leva à geração de ruído a frequências abaixo de 1 kHz. Da mesma forma, um pavimento de textura rugosa gera mais ruído de baixa frequência. Felizmente, os seres humanos não ouvem bem as frequências baixas. No limite antecessor e sucessor da zona de contacto, são geradas frequências mais altas (> 1 kHz).

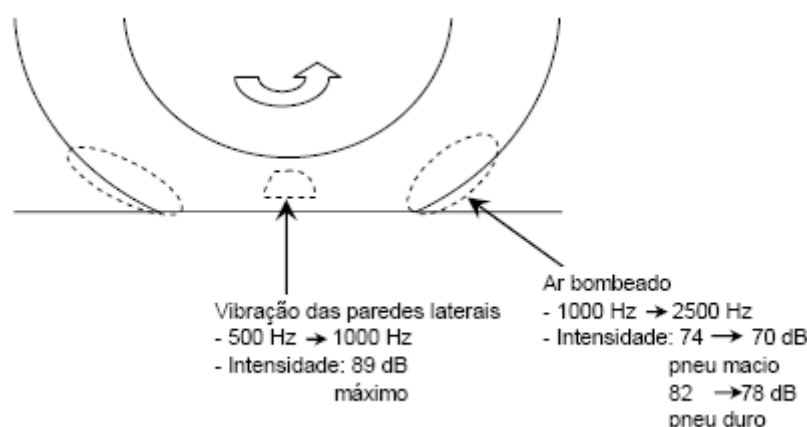


Fig. 3.7- Mecanismos de ruído (Santos, 2007)

Os mecanismos de deslizamento (*slip*) do pneu e o bombeamento do ar originam uma emissão de ruído significativa na escala de frequências que melhor é captada na orla das auto-estradas. Os efeitos de fricção, causados pelo deslizamento do pneu sobre a superfície do pavimento, aumentam à medida que a textura do pavimento aumenta. A textura superficial ou rugosidade é dada pela macro e microtextura do revestimento que contribui para a interpenetração das superfícies em contacto (pneu / pavimento), mobilizando a principal componente da aderência (atrito por adesão) para velocidades de circulação médias e baixas. Em conjunto com a geometria do rasto do pneu, a macrotextura do pavimento facilita o escoamento da água quando chove. Este efeito reduz a espessura da lâmina líquida sob o pneu e reduz o risco de hidroplanagem.

No entanto, o ruído devido à extracção do ar aumenta em pavimentos mais lisos. Assim, os níveis de ruído totais constituem funções da textura da superfície e contêm vários componentes ou fontes secundárias da interacção pneu/pavimento.

Para velocidades acima dos 35 km/h o ruído pneu/pavimento é a fonte de ruído dominante, enquanto que o ruído do motor exerce pouca ou nenhuma influência sobre o ruído total emitido pelo veículo. Para camiões e autocarros, o cruzamento entre o ruído do motor e o ruído pneu/pavimento ocorre a velocidades mais elevadas acima dos 55 km/h (Fig. 3.8).

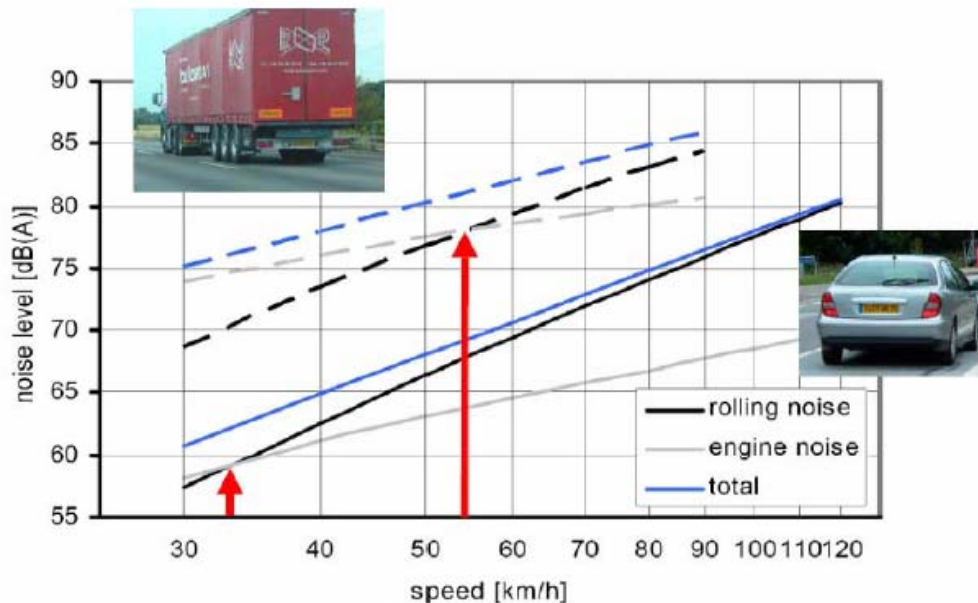


Fig. 3.8- Ruído do motor, ruído pneu/pavimento e ruído total apresentados para veículos ligeiros e pesados, em função da velocidade (Santos, 2007)

As superfícies “silenciosas” de pavimentos desenvolvidas actualmente na Europa têm, na maior parte, uma estrutura porosa e uma superfície de circulação com pequenos grânulos. Em termos gerais, a expectativa é que a porosidade reduza alguns dos mecanismos aerodinâmicos de geração ruído e que a baixa granulometria impeça ou diminua as vibrações sobre o pneu.

Na análise das causas do ruído pneu/pavimento é importante ter em atenção os vários factores do pavimento em interacção, nomeadamente a dimensão dos agregados, percentagem de betume e porosidade. O agregado à superfície tem um papel significativo no que respeita ao desempenho da estrada quanto ao ruído e à resistência à derrapagem aumentando a segurança de circulação.

4.

TIPOS DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

4.1. PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS

As estradas são construídas basicamente para criar um caminho linear e com inclinações ligeiras por forma a facilitar o percurso entre dois locais mais ou menos distantes.

Pode dizer-se que os pavimentos rodoviários são estruturas laminares estratificadas, que se apoiam sobre um solo de fundação, tendo que suportar as cargas do tráfego e acções diversas durante um período de vários anos (Pinto, 2003).

4.1.1 PAVIMENTOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS

Os pavimentos rodoviários são, geralmente, classificados consoante a deformabilidade das camadas constituintes e tendo em conta as propriedades dos diferentes materiais utilizados, em três categorias: flexíveis, rígidos e semi-rígidos. Esta distinção é baseada na sua estrutura, visto que cada um destes pavimentos apresenta uma constituição diferente, com camadas diferenciadas, relativamente a características geométricas e mecânicas.

O comportamento, como um todo, dos vários tipos de pavimentos é em princípio idêntico, contudo, a resposta de cada uma das camadas que os constituem é diferente.

Os pavimentos flexíveis são constituídos por camadas de material granular e por camadas de misturas betuminosas. Estas camadas têm, geralmente, maior deformabilidade quando comparadas com uma laje de betão de um pavimento rígido.

Deste modo, a degradação das cargas transmitidas pelos veículos processa-se de forma distinta consoante o tipo de pavimento. A título de exemplo, na Fig. 4.1, é possível observar o

comportamento de uma solicitação representada por um pneu num pavimento flexível em comparação com um pavimento rígido. Conforme se pode verificar, a carga ao nível da fundação é a mesma, embora as características geométricas e mecânicas das camadas que constituem os dois tipos de pavimentos, sejam muito diferenciadas entre si.

Num pavimento flexível, como a camada com funções estruturais é normalmente a camada granular de base, a degradação das tensões é maior ao nível dessa mesma camada. Por outro lado, num pavimento rígido, as tensões são degradadas mais à superfície, já que a camada estrutural deste tipo de pavimento é a camada mais superficial.

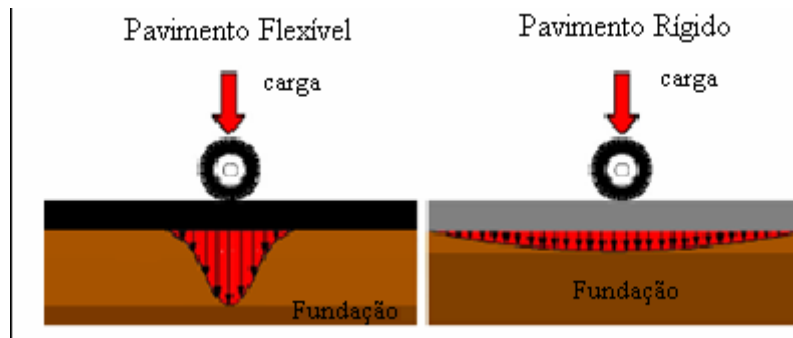


Fig. 4.1 - Distribuição de tensões verticais num pavimento flexível e num pavimento rígido (Alves, 2007)

A realidade nacional mostra a generalização dos pavimentos flexíveis em percursos inter-urbanos e suburbanos. No interior das cidades, o pavimento flexível tem muitas vezes uma vantagem em relação ao pavimento rígido, porque permite proceder mais facilmente a trabalhos de escavação e de reposição.

Assim, os materiais que caracterizam as camadas do pavimento devem possuir determinadas propriedades e garantir determinados desempenhos para que o pavimento no seu conjunto possa oferecer as condições para as quais foi dimensionado, daí surge o conceito de “Pavimento Perpétuo” (Santos, 2007) para fazer face ao aumento da agressividade do tráfego. O pavimento perpétuo apresenta as características, sintetizadas na Figura 4.2, e as funções desejáveis de cada camada.

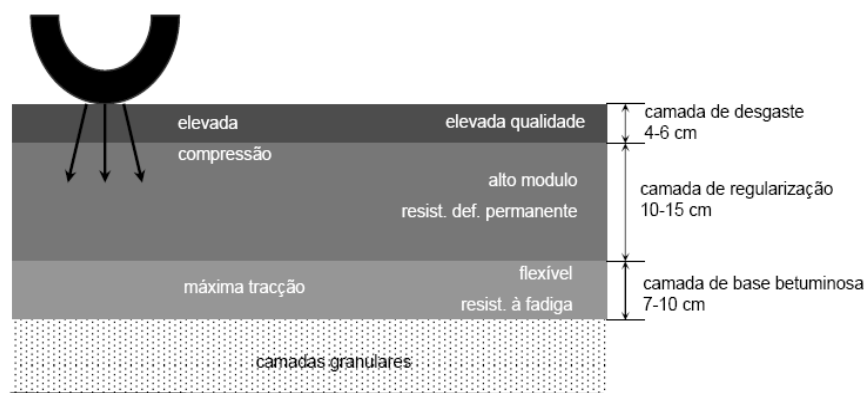


Fig. 4.2 - Conceito de pavimento perpétuo (Santos, 2007)

Os pavimentos perpétuos são concebidos para uma vida útil de 50 anos, considerando uma substituição periódica, após 20 anos de serviço, de 2,5 cm a 10 cm da superfície. Esta duração poderá ser atingida, evitando que o fendilhamento origine na base da camada betuminosa, por intermédio do aumento da sua espessura. O período de substituição da camada superficial fica condicionado pelos níveis de desenvolvimento de rodeiras não estruturais e de fendilhamento com origem na superfície.

Actualmente, aos requisitos de um pavimento flexível tradicional ou perpétuo deve-se ainda adicionar o requisito de silencioso.

Assim, as camadas com características de desgaste de um pavimento flexível tradicional, perpétuo ou silencioso podem ser realizadas em betão betuminoso, em betão betuminoso drenante, em micro-betão rugoso, em argamassa betuminosa e em betão betuminoso de borracha. Além disso, poder-se-á utilizar os tratamentos superficiais, quando se pretender dotar um pavimento de certa qualidade quanto às características superficiais, sem aumentar a sua capacidade estrutural, nem atenuar a irregularidade que talvez apresente.

Das camadas de desgaste referidas, as camadas drenantes são naturalmente silenciosas, devido à sua elevada porosidade. Alguns estudos realizados em auto-estradas, a uma velocidade de 110 km/h, determinam que a camada drenante é mais silenciosa do que a de betão betuminoso (Freitas *et al.*, 2008). O nível de ruído para pavimentos com camada de desgaste em betão betuminoso é de 82 dB(A) e para camadas em betão betuminoso drenante é de 79 dB(A).

Porém, quando comparada com uma dupla camada drenante, esta diferença ainda se apresenta maior, visto que os níveis de ruído obtidos são de 77 dB(A).

O pavimento flexível (Branco *et al.*, 2006) é uma estrutura com deformabilidade elevada ao nível das camadas superiores que são formadas por misturas betuminosas, seguidas inferiormente de uma ou duas camadas de material granular.

No quadro 4.1 são referidas as principais características das camadas constituintes dos pavimentos flexíveis e os intervalos de espessuras, geralmente, definidos para as mesmas.

O pavimento semi-rígido (Branco *et al.*, 2006) tem uma deformabilidade reduzida e relativamente à sua constituição tem características comuns tanto ao pavimento rígido como ao flexível. Tem uma ou duas camadas superiores constituídas por misturas betuminosas, seguidas de uma camada de agregado estabilizado com ligante hidráulico (camada de base que possui função determinante na estrutura do pavimento), podendo ainda dispor de uma camada granular na sub-base conforme quadro 4.2.

O pavimento rígido, (Branco *et al.*, 2006) tem uma deformabilidade muito reduzida e apresenta uma camada superior de desgaste constituída por betão de cimento (material granular estabilizado com ligantes hidráulicos de elevada resistência), normalmente o cimento *portland*, seguida de uma ou duas camadas inferiores constituídas também por material granular estabilizado com ligante hidráulico e/ou apenas constituídas por material granular conforme o quadro 4.3.

Quadro 4.1 - Características de pavimentos flexíveis (Branco *et al.*, 2006)

Camadas	Características	Espessuras tipo
Camada de desgaste	Constituída por material betuminoso, com agregados de alta resistência (com dimensões geralmente reduzidas - diâmetro médio de 3 a 4 cm), suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores, as tensões induzidas pelos rodados dos veículos.	4-6 cm
Camada de regularização	Constituída por mistura betuminosa à semelhança da primeira, no entanto com materiais mais pobres (quer no betume quer nso agregados); suporte da camada de desgaste;	5-12 cm
Camada de base	Constituída por agregado britado de granulometria extensa (ABGE), produzido artificialmente em pedreira e vulgarmente conhecido por tout venat; camada mais importante deste tipo de pavimento - camada estrutural;	15-30 cm
Camada de sub-base	Constituída por material granular do tipo tout venant ou com recomposição em central; suporta, redistribui e transfere para a fundação, as tensões transmitidas ao nível da base; características drenantes	15-20 cm

Quadro 4.2 - Características de pavimento semi-rígido (Branco *et al.*, 2006)

Camadas	Características	Espessuras tipo
Camada de desgaste	Constituída por material betuminoso, com agregados de alta resistência (com dimensões geralmente reduzidas - diâmetro médio de 3 a 4 cm), suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores, as tensões induzidas pelos rodados dos veículos;	4-6 cm
Camada de regularização	Constituída por mistura betuminosa à semelhança da primeira, no entanto com materiais mais pobres (quer no betume quer nso agregados); suporte da camada de desgaste; suporta, redistribui e transfere para as camadas inferiores.	5-12 cm
Camada de base	Constituída por agregado britado de granulometria extensa (ABGE), produzido artificialmente em pedreira e vulgarmente conhecido por tout venat; camada mais importante deste tipo de pavimento - camada estrutural.	15-30 cm
Camada de sub-base	Constituída por material granular do tipo tout venant ou com recomposição em central; suporta, redistribui e transfere para a fundação, as tensões transmitidas ao nível da base; características drenantes - drenagem do pavimento.	15-20cm

Quadro 4.3 - Características de pavimento rígido (Branco *et al.*, 2006)

Camadas	Características	Espessuras tipo
Camada de betão de cimento	Camada estrutural do pavimento com características de impermeabilização constituída por uma lage de betão de cimento compactado por vibração; apresenta superfície regular, desempenada adequada à circulação de veículos em condições de conforto, economia e	20-25 cm
Camada de sub-base	Constituída por material granular (agregado de granulometria extensa estabilizado com cimento) ou betão pobre ou solo-cimento (material granular estabilizado com ligante hidráulico para os casos de tráfego intenso); suporta, redistribui e transfere para a	15-20 cm

Diversas pesquisas efectuadas demonstram que os pavimentos rígidos produzem geralmente mais ruído ao longo das auto-estradas. No entanto, estes pavimentos apresentam a vantagem de possuir uma maior durabilidade e atrito de superfície, em comparação com os pavimentos com camada em betão betuminoso (Alves, 2007).

4.1.2 TEXTURA DA SUPERFÍCIE DA CAMADA DE DESGASTE

A textura da superfície da camada de desgaste de um pavimento desempenha um papel determinante para a sua qualidade funcional, principalmente no que está relacionado com os seguintes aspectos, desenvolvimento das forças de atrito no contacto pneu/pavimento em condições desfavoráveis piso húmido ou molhado; resistência ao movimento (consumo de combustível); desgaste dos pneus por micro-deslizamento da borracha no contacto pneu/pavimento; ruído de baixa frequência, no interior e no exterior dos veículos; vibrações transmitidas pela coluna de direcção ao volante e ao interior dos veículos (Branco *et al.*, 2006).

A textura tem, desta forma, influência no que respeita à segurança, ao custo de operação dos veículos, ao conforto, e ao ambiente, o que torna esta característica de avaliação muito importante.

A textura de um pavimento é determinada pelas suas irregularidades superficiais, que vão desde os mais finos detalhes da microtextura, passando pelas particularidades da macrotextura, até às maiores ondulações da megatextura (Fig. 4.3).

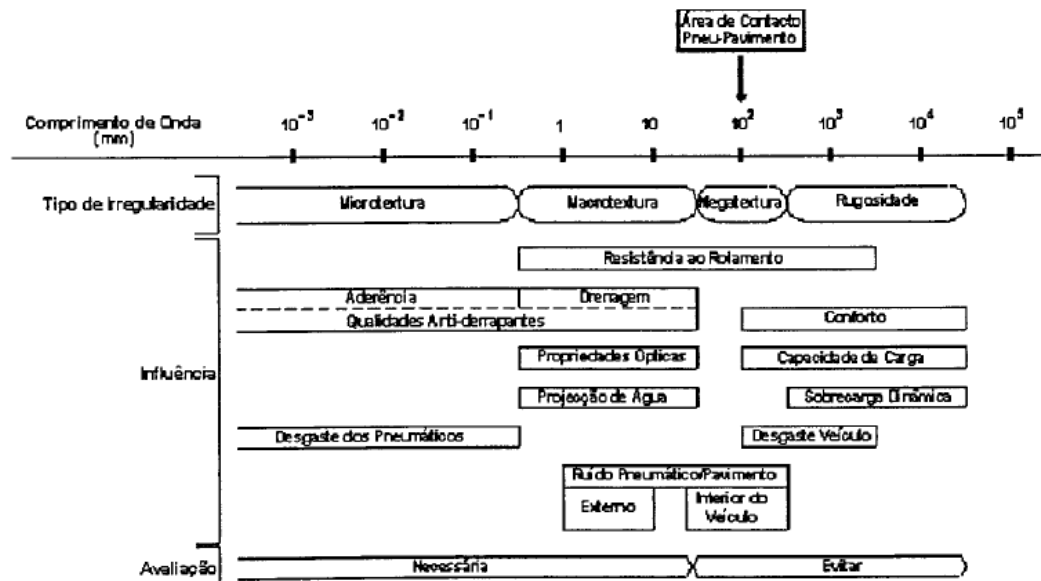


Fig. 4.3 - Microtextura e macrotextura de um pavimento (Alves, 2007)

A distinção entre os vários tipos de domínios ou escalas de texturas é função do comprimento de onda considerado. No quadro 4.4 apresenta-se uma proposta de intervalos de dimensões de textura para um pavimento.

Quadro 4.4 - Dimensões de textura para um pavimento (Alves, 2007)

Designação	Intervalo de dimensões aproximado	
	Comprimentos de onda (horizontal)	Amplitudes (vertical)
Microtextura	0-0,5mm	0-0,2mm
Macrotextura	0,5-50mm	0,2-10mm
Megatextura	50-500mm	1,0-50mm

As propriedades de ruído das superfícies alteram-se ao longo do tempo. Para alguns tipos de superfície, esta mudança pode ser bastante pequena, mas para outras superfícies pode ser dramática. Usualmente, as perdas destas propriedades podem ser classificadas como físicas ou temporais, sendo os seguintes fenómenos mais preponderantes:

- a mega e macrotextura sofrem alterações, porque as partículas do pavimento e outros materiais sofrem desgaste;
- a mega e macrotextura, assim como a rigidez, sofrem alterações devido à compressão da estrutura da superfície pelo tráfego;
- a microtextura sofre alterações, principalmente devido ao efeito de polimento exercido pelos muitos pneus que passam sobre a superfície;

- os efeitos de origem química provocados nos componentes do pavimento pelas variações climáticas ao longo do tempo, em conjunto com o sal colocado nas estradas, no caso da presença do gelo e/ou neve, resultam na desagregação e perda do material fino, afectando quer a micro quer a macro textura. A chuva também representa um papel relevante na alteração da microtextura, podem ocorrer fendas;

- se a superfície for porosa, os seus poros acabarão por ficar obstruídos pela acumulação de sujidade, no entanto, as superfícies porosas de camada dupla podem revelar-se mais eficientes, já que a camada porosa superior, constituída por granulometria pequena, actua como um filtro, acumulando a maior parte dos detritos e deixando a camada porosa inferior de agregado mais largo relativamente livre de detritos. Este tipo de superfície, em camada dupla, permite que o processo de limpeza seja mais eficiente na retenção da porosidade da superfície, do que os designados por camada única, podendo assim aumentar a longevidade dos benefícios acústicos (FEHRL, 2006).

No entanto, após um período de estabilização, algumas superfícies podem provocar um significativo aumento dos níveis de ruído, particularmente à medida que atingem o final das suas vidas. As superfícies betuminosas que apresentam desagregação após longos períodos sob pesada acção do tráfego, bem como o surgimento de fendas e o endurecimento do betão devido a longa exposição, podem também contribuir para elevados níveis de ruído pneu/pavimento. As superfícies de betão podem também apresentar características similares, como por exemplo no caso do betão ranhurado, em que após um período de elevada exposição ao tráfego se verifica um desgaste das ranhuras, promovendo níveis de ruído mais elevados (Bernhard, 2005).

A profundidade da textura representa o desvio médio de uma superfície de estrada totalmente plana, dentro de qualquer categoria de textura (micro, macro e megatextura).

Uma diferença importante entre superfícies e que exerce um elevado efeito sobre a geração do ruído, consiste no grau de protuberância das partículas de agregado em relação ao plano da zona de contacto do pneu. De um modo geral são descritas como texturas positivas e texturas negativas, como se ilustra na Fig. 4.4.

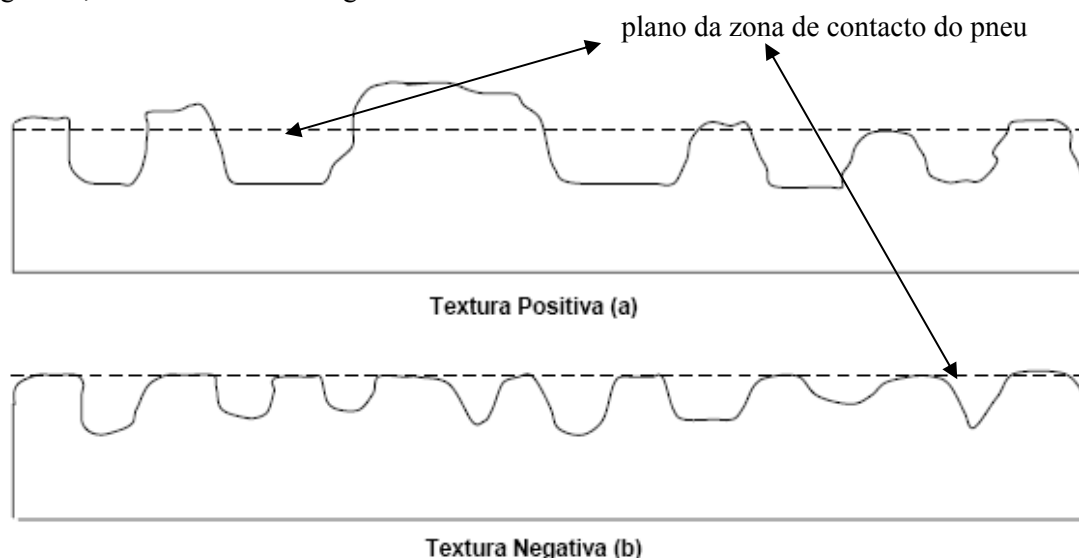


Fig. 4.4- Detalhes de superfícies com texturas positiva (a) e negativa (b) (Alves, 2007)

A textura positiva é formada por partículas ou arestas em protuberância acima do plano da superfície. Geralmente, estas texturas são formadas pela aplicação de agregados sobre uma superfície essencialmente lisa durante a construção.

Textura negativa é um termo usualmente aplicado a materiais em que a textura abrange largamente os vazios entre as partículas cujas superfícies superiores formam uma face essencialmente plana, típica dos sistemas de superfície fina. Os pavimentos em betão betuminoso, revestimento superficial e betão por escovagem são geralmente considerados de texturas positivas, enquanto que nos pavimentos em betão betuminoso drenante, os revestimentos delgados e o betão de agregado exposto são geralmente considerados de texturas negativas.

Dependendo do tamanho da granulometria, a textura positiva leva a níveis mais elevados de vibrações sobre o pneu em andamento, ao passo que a textura negativa contribui para os níveis de ruído mais baixos.

A forma das partículas do agregado na superfície que possibilitam a resistência à derrapagem, podem também exercer efeito sobre a emissão de ruído. Partículas de natureza mais cúbica, adaptam-se melhor à superfície, fornecendo uma área mais plana para circulação do pneu e consequentemente garantir que o contacto do pneu seja espalhado mais uniformemente sobre a mesma, reduzindo assim a aparente zona de contacto. Pelo contrário, uma superfície mais rugosa aumenta a zona de contacto, o que aviva o ruído pneu/pavimento, uma vez que o ruído é função do comprimento da zona de escape do ar comprimido.

As altas velocidades, a compressão e libertação do ar comprimido sob o pneu são uma componente significativa do ruído produzido pelo pneu. Desde que haja uma interligação suficiente entre os vazios abaixo da superfície de rodagem, as superfícies de estrada com texturas negativas reduzem a quantidade de ruído gerado através da redução da pressão de ar dentro da zona de contacto. Logo, para a mesma profundidade de textura, as superfícies designadas por negativas geram muito menos ruído de pneu (Santos, 2007).

4.1.3 TIPOS DE CAMADAS DE DESGASTE

Para este estudo o que se revela mais importante são as camadas de desgaste.

Na camada de desgaste os pavimentos porosos são os mais utilizados e geralmente apresentam uma espessura compreendida entre os 3 e os 6 cm (Santos, 2007). São formados por uma mistura betuminosa porosa (com betume modificado) que absorve parte do ruído. A sua percentagem de vazios deve ser superior a 20%. Acusticamente, são melhores para as médias e altas frequências. Os seus coeficientes de absorção aproximados para baixas (0-700 Hz), médias (700-1250 Hz) e altas (1250-2000 Hz) frequências são cerca de 0,2; 0,45 e 0,60 respectivamente.

Perante a experiência de que um reduzido tamanho máximo de granulometria proporciona um melhor desempenho acústico e para não prejudicar as suas propriedades drenantes, foi desenvolvido um pavimento poroso de dupla camada (*Twinlayer*). A camada superior (2 a 3 cm) é constituída por agregados de pequena dimensão, para minimizar a geração de ruído, e a

camada inferior (3 a 5 cm) por agregados de dimensão superior, para aproveitar as propriedades de absorção sonora dos pavimentos porosos. Estes pavimentos apresentam o inconveniente das partículas se acumularem com facilidade na interface, neutralizando, a longo prazo, as propriedades da camada inferior. Além disso, a sua aplicação em obra é mais trabalhosa e o seu custo mais elevado do que um pavimento poroso tradicional.

Os pavimentos com misturas de betumes modificados com polímeros, são misturas em que se utiliza como ligante betume modificado com polímeros, podendo ser estes termoplásticos e os elastómeros (Batista, 2004). Um betume modificado por polímero, aumenta a viscosidade, aumenta a temperatura de amolecimento, tem uma melhor resistência ao envelhecimento e uma melhor adesividade.

Para camadas de desgaste os betuminosos modificados com polímeros são utilizados em dois tipos de misturas, misturas betuminosas drenantes e misturas betuminosas rugosas. As misturas betuminosas rugosas tem melhor aderência, maior durabilidade, menor susceptibilidade térmica e maior flexibilidade. As misturas betuminosas drenantes além de proporcionarem uma melhor circulação em tempo de chuva, proporcionam a diminuição do ruído de rolamento.

Os pavimentos betuminosos modificados com borracha consistem outra opção, aplicados em camadas porosas realizadas com material proveniente de pneus reciclados. A reciclagem de pneus constitui uma técnica do ponto de vista ambiental recomendada pela Comissão Europeia. A sua utilização na construção ou na reabilitação de estradas, além de uma diminuição do ruído do rolamento tem (Batista, 2004) uma melhor resistência à fadiga e à propagação de fissuras, sendo necessária metade da espessura comparada com os betuminosos convencionais para o mesmo nível de resistência à fadiga.

Em Portugal, na realização da camada de desgaste em pavimentos flexíveis, aplica-se principalmente dois tipos de misturas, o betão betuminoso ou o betão betuminoso drenante, apesar de agora também se começar a utilizar betuminosos modificados com borracha.

4.1.4 TIPOS DE PAVIMENTOS DE BAIXO RUÍDO RECOMENDADOS

O projecto SILVIA (*SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control*), estabelecem os requisitos básicos para se obter uma camada superficial silenciosa, que podem ser resumidos da seguinte forma:

a) Nas camadas em betão betuminoso,

- Deverá obter-se a mínima megatextura e macrotextura nos comprimentos de onda de 10-50 mm;
- Deverá obter-se a máxima macrotextura nos comprimentos de onda de 1-8 mm.

b) Nas camadas superficiais porosas,

- Deverá obter-se a mínima megatextura e macrotextura nos comprimentos de onda de 10-50 mm;

- Deve ser produzida com o maior índice de vazios, pelo menos 20%, preferencialmente mais alto;
- A espessura da camada porosa deverá ser de 40 mm ou superior, de forma a atingir também a absorção de som a frequências relativamente baixas;
- A resistência à circulação de 20 a 50 kN/m⁴ para estradas de velocidades altas e 12 a 30 kN/m⁴ para estradas de velocidades baixas.

4.1.5 PAVIMENTOS SMA

Referem-se mais alguns tipos de pavimentos, como a mistura asfáltica é conhecida como *Splittmastixasphalt* na Alemanha, e como *Stone Matrix Asphalt* (SMA) nos Estados Unidos ou *Stone Mastic Asphalt* de uma forma geral, na Europa, Segundo o relatório técnico de investigação (FEHRL, 2006), o SMA é um tipo de mistura que apresenta as seguintes características:

- elevada resistência a deformações permanentes, mesmo a altas temperaturas, oriunda principalmente do tipo de estrutura granulométrica formada com alto teor de agregados graúdos ligados por uma argamassa composta por elevada fracção de finos e asfalto;
- alta estabilidade da mistura pelo contacto grão a grão dos agregados graúdos secundados por um mastique de alta viscosidade;
- flexibilidade superior aos betões asfálticos tradicionais a baixas temperaturas;
- baixo volume de vazios, que torna este tipo de revestimento praticamente impermeável, bem como dificulta a oxidação dos compostos mais leves do asfalto;
- mistura de asfalto modificado por polímeros e fibras de celulose na mistura, criando um filme ou película de ligante mais efectiva sobre o agregado, aumentando a aderência dos componentes da mistura;
- conformação da sua macro textura, que reduz o ruído do tráfego;
- elevada rugosidade superficial deste tipo de revestimento, que favorece a segurança do tráfego por diminuir o fenómeno de aquaplanagem, bem como facilitar a visibilidade dos motoristas em dias de chuva ao reduzir o *spray* de água.

A mistura asfáltica (SMA), devido às suas propriedades, também pode ser utilizada em rejuvenescimento de revestimentos desgastados, porém em boas condições estruturais (Silva, 2005).

4.1.6 PAVIMENTOS MODIFICADOS COM BORRACHA

Os betumes modificados com borracha granulada reciclada de pneus, tem sido utilizados em pavimentos rodoviários, desde os anos 1960 nos Estados Unidos.

A aplicação de betume modificado com borracha reciclada tem como principais requisitos:

- que as misturas asfalto borracha apresentem proporções de ligante de 7,0 a 10% e borracha reciclada de 18 a 20%;
- que a reacção do ligante asfáltico com borracha reciclada se processe a elevadas temperaturas.

Este processo de fabrico é chamado de via húmida (*wet process*), o outro processo de fabrico é a via seca (*dry process*) em que o granulado de borracha é adicionado com os agregados.

Em Portugal este tipo de pavimento flexível com mistura betuminosa incorporando betume modificado a partir de borracha reciclada de pneus chama-se betume modificado com borracha reciclada de pneus (BMB).

Estas superfícies demonstram um potencial muito grande (Ejsmont, 2009), para a redução do ruído do tráfego, especialmente nas estradas de velocidade baixa e moderada. Eles são menos ruidosos do que qualquer outra superfície que são utilizadas comercialmente hoje em dia. E a resistência ao rolamento dos pneumáticos não é maior que a em superfícies lisas. A Comissão Europeia planeou iniciar em 2009 um grande projecto, INQUEST, que tem como objectivo de desenvolver a confiança ambiental destas superfícies.

Outra vantagem destas superfícies é a utilização de pneus usados, que constituem um grave problema ambiental na Europa, no Japão e E.U.A..

4.1.7 PAVIMENTOS COM DUAS CAMADAS POROSAS

Como pavimento silencioso de eleição tem-se, o pavimento constituído por duas camadas porosas, é um pavimento drenante especial, essencialmente adequado à redução de ruído. O pequeno tamanho dos agregados e a elevada porosidade da camada superior, em comparação com a camada inferior, deve reduzir quer o ruído pneu/pavimento, quer o ruído mecânico.

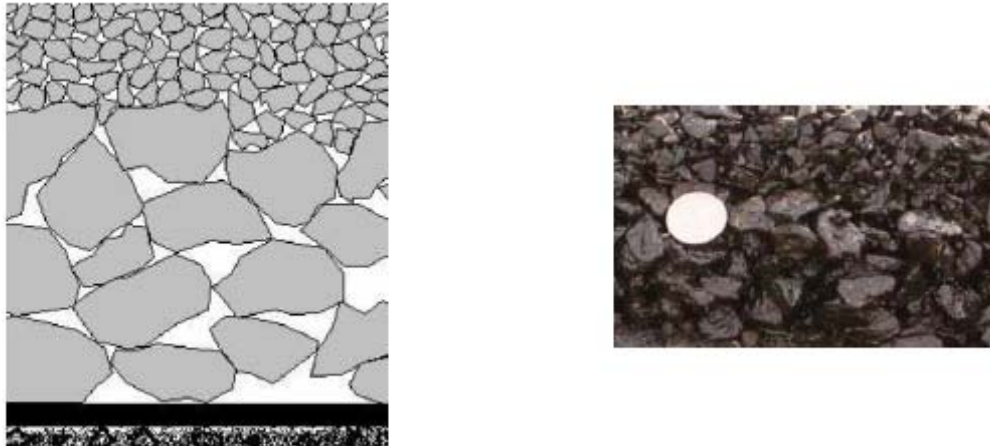


Fig. 4.5 - Configuração de uma camada de desgaste drenante constituída por duas camadas porosas (Santos, 2007)

As camadas drenantes constituídas por duas camadas porosas, são essencialmente formadas por uma primeira camada, com sensivelmente 45 mm de espessura, e constituída por uma granulometria mais grossa, com cerca de 25% de porosidade e por uma segunda camada, com uma espessura compreendida entre os 15 e 25 mm, de granulometria mais fina, apresentando uma porosidade de cerca de 20%. O ligante utilizado geralmente é um ligante modificado por adição de polímeros ou destes com borracha. A configuração destas duplas camadas porosas pode ser avaliada na Fig. 4.5.

4.1.8 SUPERFÍCIES PORO-ELÁSTICAS

As superfícies designadas por poro-elásticas (PERS), são superfícies com um teor muito elevado de vazios interligados, de forma a facilitar a passagem de ar e água. A formulação destas misturas deve ser elaborada considerando uma porosidade de pelo menos 20%. As camadas poro-elásticas podem ser executadas *in-situ* ou pré-fabricadas, apresentando geralmente uma espessura de 3 a 4 cm, assim como reduções de ruído extremamente elevadas (geralmente 10 a 12 dB(A)). No entanto, este tipo de superfície rodoviária encontra-se ainda numa fase experimental, pois são de custos elevados devido ao elevado número de ingredientes muito caros.

4.2 PAVIMENTOS DE BAIXO RUÍDO DO FUTURO

Estão a ser estudados diversos tipos de pavimentos, (Bernhard, 2005) sendo os mais promissores (Fig. 2.14):

- Pavimentos eufônicos/modulares, são constituídos por uma primeira camada porosa de 4 a 6 cm (que proporciona propriedades drenantes e absorventes) colocada sobre uma camada em betão, em cujo interior são alojados ressoadores de Helmholtz, repartidos por cada 500 cm³ de pavimento;
- *Modieslab* - Placas pré-fabricadas de betão poroso de duas camadas em estacas, que oferece uma previsão de redução de ruído de 7 dB(A), em comparação com a superfície de referência de betão betuminoso holandesa;
- *The Very Silent Noise Module*: Ressonadores *Helmholtz* em betão de cimento com uma camada superior muito fina de pavimento silencioso, que oferece uma previsão de redução de ruído de 5 dB(A), em relação à superfície de referência de betão betuminoso holandesa;
- *Rollpave* e *The Adhesive Road* - Betão betuminoso poroso enrolável com uma camada adesiva de suporte geostática, que oferece uma previsão de redução de ruído de 6 dB(A), em relação à superfície de referência de betão betuminoso holandesa.

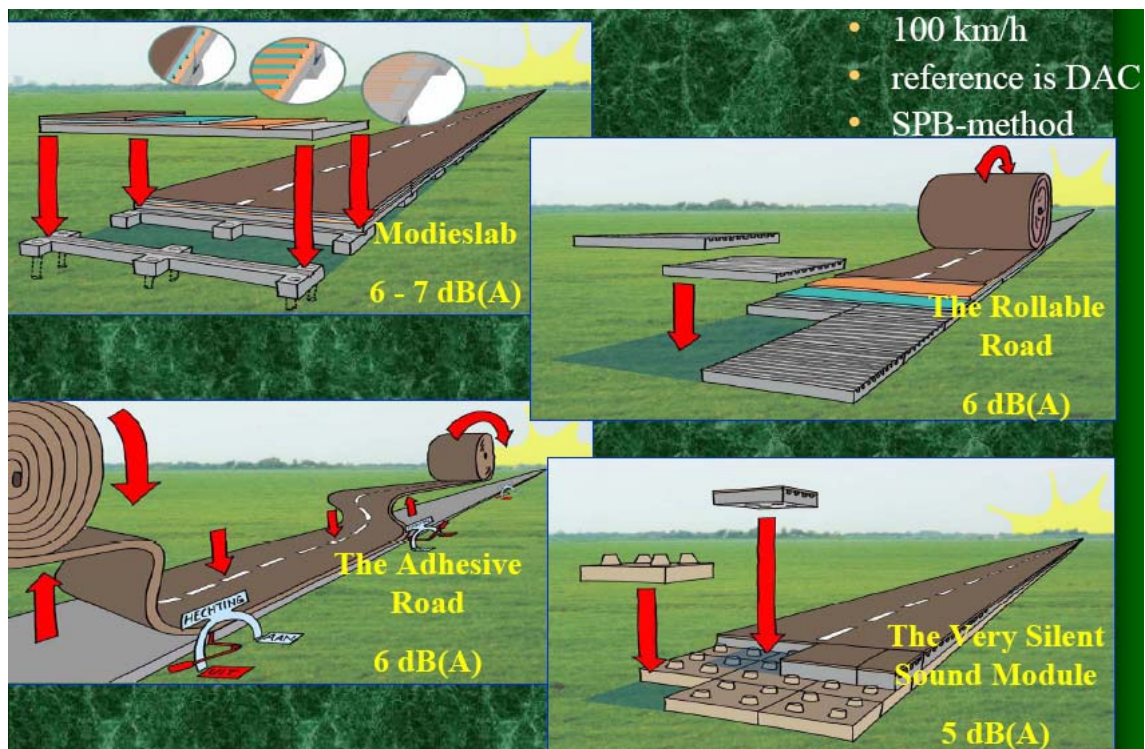


Fig. 4.6 - Pavimentos em estudo com os valores de redução de ruído (Bernhard, 2005)

4.3 OBJECTIVOS DEFINIDOS PELA UNIÃO EUROPEIA

A União Europeia define como objectivo principal para 2020, (CALMII, 2007) a redução da emissão sonora do tráfego rodoviário em 10 dB(A), apoiando a investigação e posterior legislação, relativa a novas metodologias de construção e materiais de superfícies silenciosas, optimização do tipo de pneus mais silenciosos, intervenção em todos os componentes do veículo par uma melhoria na emissão de ruído e uma melhor gestão do tráfego rodoviário, conforme a Fig. 4.7.

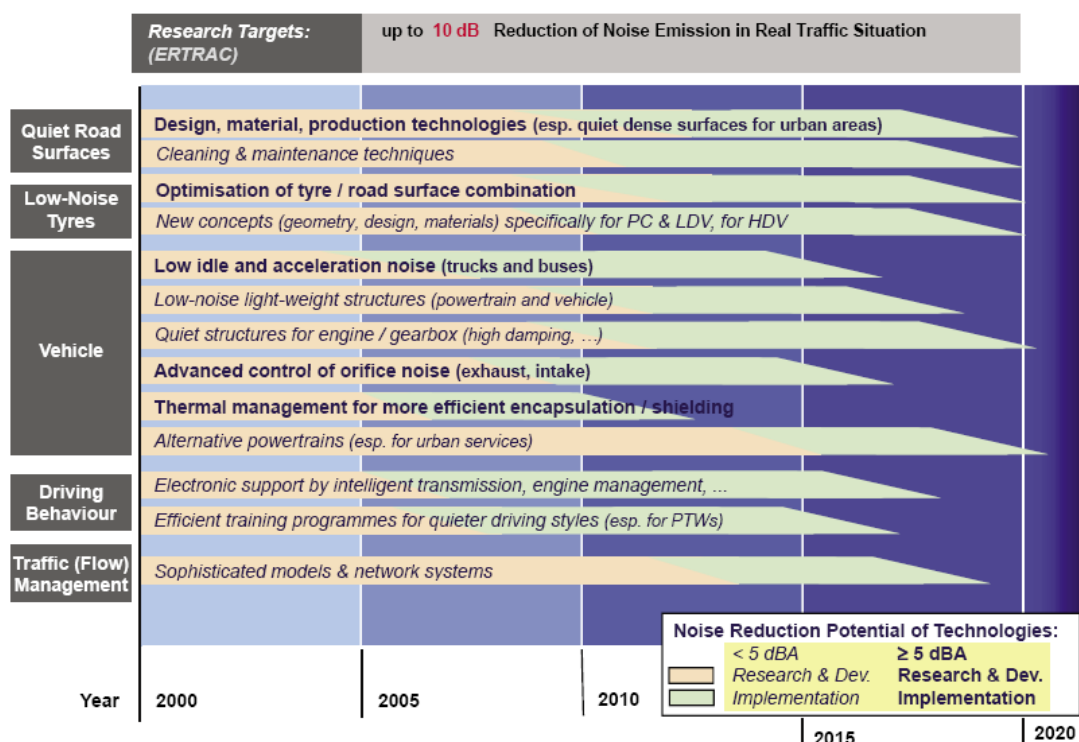


Fig. 4.7 - Objectivos a atingir pela União Europeia. (CALMII, 2007)

A União Europeia apoiou e está a apoiar mais estudos para que seja possível reduzir a poluição sonora relacionada com os transportes, conforme Fig. 4.8:

Nem sempre os resultados da investigação são implementados ou completamente implementados e as principais razões são o alto custo dos novos materiais, conflitos com outros objectivos, o ciclo de vida do novo produto e demora de produção em quantidade.

Para um desenvolvimento sustentado, de uma Europa mais silenciosa tem que haver um equilíbrio na investigação de emissão de ruído, propagação e a sua percepção.

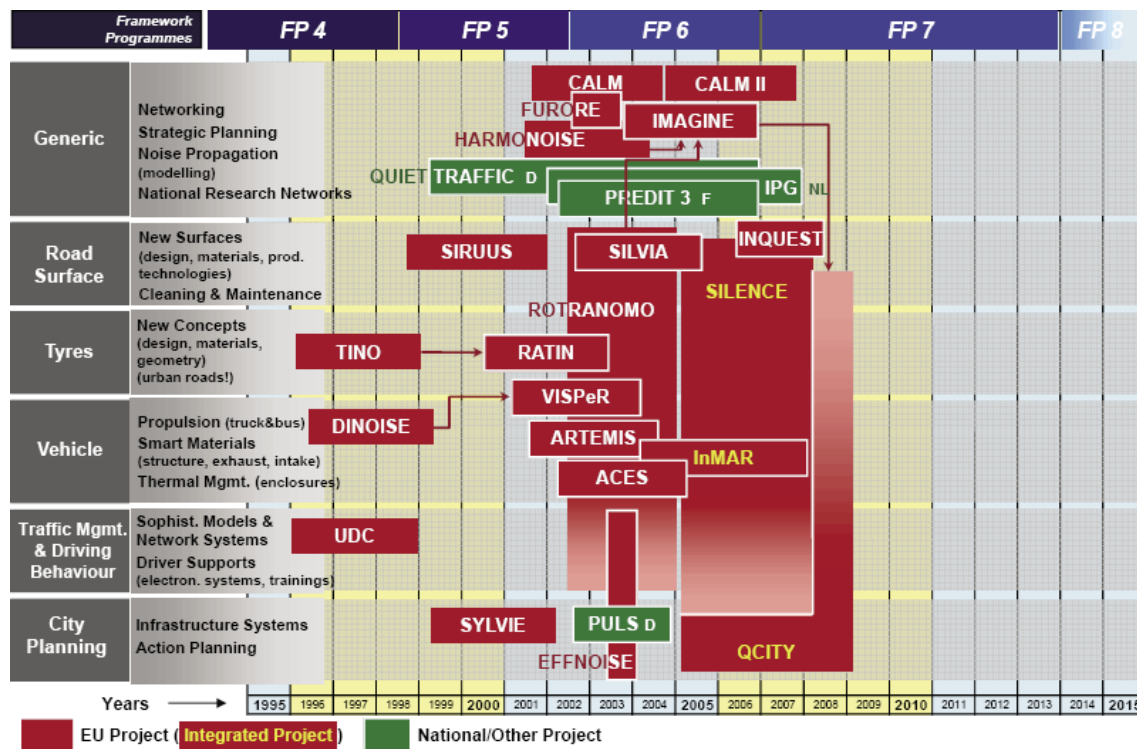


Fig. 4.8 - Estudos patrocinados pela União Europeia (CALMII, 2007)

Todos os estudos estão integrados, para poderem conduzir a uma melhor definição política do planeamento de transportes, das suas vias e um melhor urbanismo, já que a mobilidade terrestre é um dos vectores principais do desenvolvimento futuro.

5.

ENSAIOS DE ACÚSTICA

5.1 AVALIAÇÃO DO RUÍDO

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, que estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora, visando a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações.

A avaliação do ruído ambiental é feita com ensaios de caracterização do ruído ambiente, pela determinação dos níveis de pressão sonora, incluindo a verificação do critério da exposição máxima e/ou do critério dos acréscimos em actividades ruidosas permanentes, temporárias, outras fontes de ruído susceptíveis de causar incomodidade e ruído de vizinhança.

O efeito do contacto pneu/ pavimento é a principal causa do ruído para as superfícies de estrada. A avaliação do ruído é feita pelos seguintes ensaios (FEHRL, 2006):

- i. Método Estatístico de passagem (SPB), *Statistical Pass-By method*;
- ii. Método da estrada proximidade (CPX), *Close –Proximity method*;
- iii. Método da passagem controlada (CPB); *Coast-By*
- iv. Método da superfície estendida (ESM).

5.2 MÉTODO ESTATÍSTICO DE PASSAGEM (SPB) / CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO NORMAL

Este método é executado de acordo com a Norma ISO 11819-1: 1997: “*Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By method*”. Baseia-se na determinação do nível sonoro máximo a 7,5 m da via, à passagem de três diferentes classes de veículos (ligeiros, pesados com dois eixos e pesados com mais de dois

eixos). A amostra é caracterizada por um vasto número de veículos, pelo menos 100 ligeiros, 30 pesados com dois eixos e 30 pesados com mais de dois eixos.

A norma estabelece as seguintes considerações para a selecção do local:

- a) Cada trecho de teste deverá ter uma extensão de, pelo menos, 30 m para ambos os lados do local onde se encontra o microfone. Para a categoria de estrada de velocidade "elevada" esta distância deverá ser aumentada para 50 m;
- b) A estrada deverá ser essencialmente plana e em linha recta. Estradas com curvaturas ligeiras ou com inclinação $<1\%$ poderão ser consideradas como locais de teste válidos para as finalidades desta secção da ISO 11819;
- c) O número de veículos considerado como movendo-se a velocidade constante deve ser suficiente para permitir um tempo de medição total razoável;
- d) Apenas antes e imediatamente depois da passagem de um veículo seleccionado para medição, o nível de pressão sonora, ponderado A, deverá ser de, pelo menos, 6 dB abaixo do nível máximo de pressão sonora, ponderado A, durante a passagem;
- e) A superfície da estrada deverá estar em boas condições, a menos que a intenção seja estudar os efeitos das condições do pavimento, e deverá ser homogénea em relação a todo o trecho do ensaio;
- f) O tráfego que circula no trecho de estrada em questão deve apresentar números suficientes de cada uma das categorias de veículos para permitir a realização de uma análise cabal de cada categoria de veículo;
- g) Não deverão existir grandes superfícies reflectoras, tais como barreiras de segurança sólidas ou taludes, no espaço de 10 m a partir de uma linha traçada desde a posição do microfone de medição, cruzando a estrada perpendicularmente à linha de percurso. Este aspecto é apresentado como um rectângulo na Fig. 5.1.

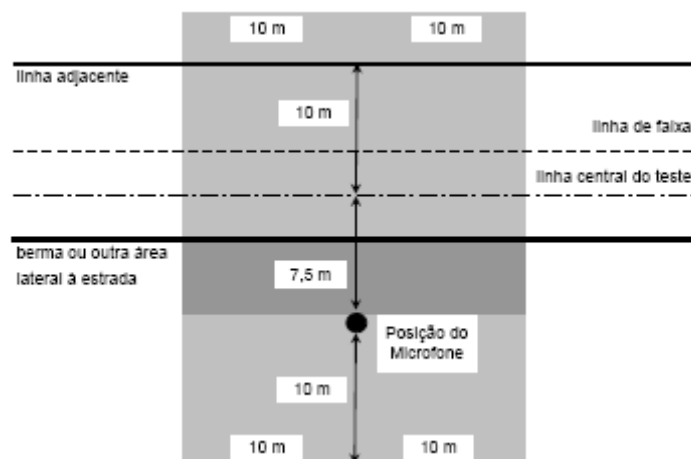


Fig. 5.1- Definição da zona onde não é permitida a existência de quaisquer barreiras de segurança para o ensaio (Norma ISO 11819-1:1997)

h) Idealmente, a superfície entre a posição do microfone e a borda da faixa de teste deverá estar pavimentada com o mesmo material que a superfície de estrada na faixa de medição. No entanto, em alguns locais poderá não ser possível obter estas condições. Quando se efectuam as medições para a classificação das superfícies, é necessário assegurar, pelo menos, que metade da área localizada entre o centro da faixa de teste e o microfone tem propriedades acústicas semelhantes às da superfície a ser testada, que esteja essencialmente ao mesmo nível que a superfície de estrada (Fig. 5.2).

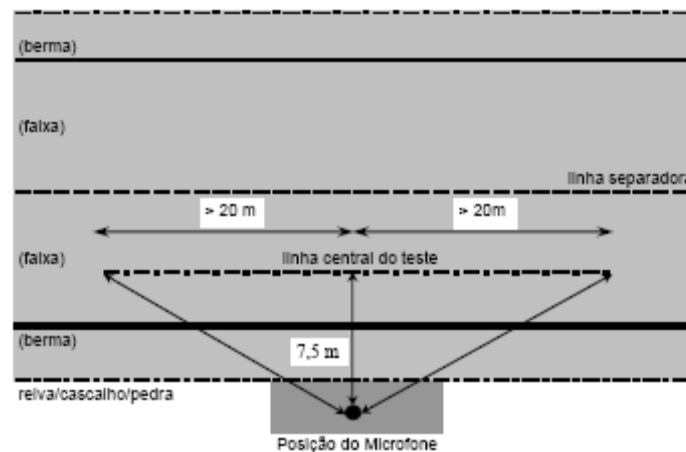


Fig. 5.2 - Exigências relativamente à área que o tipo de superfície deverá abranger no ensaio (Norma ISO 11819-1:1997)

Os resultados são normalizados para um (o mais adequado) de três grupos de velocidades [baixa (45 a 64 km/h), média (65 a 99 km/h) e alta (100 km/h ou mais)] e comparados, para as três diferentes classes de veículos, com os resultados em outra superfície para a mesma velocidade normalizada. Em cada medição é controlada a velocidade do veículo, a temperatura do ar e a temperatura do pavimento (ISO 11819-1: 1997) (Fig. 5.3).



Fig. 5.3 - Método estatístico de passagem (Santos, 2007)

As principais vantagens deste método SPB são:

- O facto de o operador estar muito próximo da via e ser ele a seleccionar os veículos a que vai efectuar o teste, possibilita uma filtragem de situações anormais, nomeadamente as associadas ao comportamento dos condutores (buzinadelas, carga mal condicionada com ruído aerodinâmico excessivo, etc.);
- A caracterização da circulação rodoviária típica da via, depende apenas da amostra seleccionada;
- Não é necessário condicionar o tráfego.

Por sua vez tem como desvantagens:

- O ruído do motor não permite saber exactamente a influência do ruído pneu/pavimento;
- Não é controlado o tipo de pneus e a idade dos veículos, o que faz com que, em situações específicas, possam ocorrer incertezas relativamente à verdadeira eficácia do pavimento;
- É necessário um elevado número de medições.

5.3 MÉTODO DA ESTRITA PROXIMIDADE (CPX) / CARACTERIZAÇÃO MUITO PRÓXIMA

Este método é executado de acordo com a Norma ISO 11819-2: “Acoustics –Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close – Proximity method”.

Para a medição do ruído é utilizado um atrelado de teste normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e um ou mais microfones junto do pneu. O atrelado possui um “compartimento”, condicionado acusticamente, que protege o microfone de ruídos parasitas (o ruído aerodinâmico e o ruído do tráfego rodoviário normal da via) (ISO 11819-2: 2000) (Fig. 5.4).

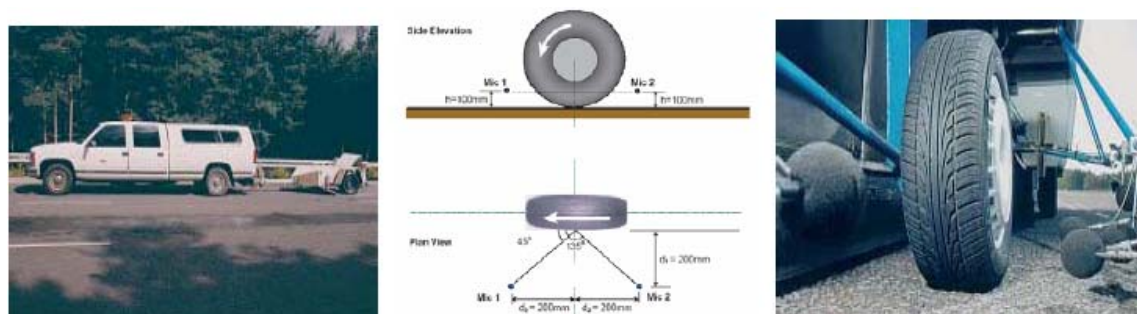


Fig. 5.4- Método da estrada proximidade (CPX) (Santos, 2007)

Este método apresenta como principais vantagens:

- A utilização do atrelado diminui a incerteza na determinação da eficácia do pavimento;
- É caracterizada a exacta influência do pavimento no ruído de rolamento;
- Não é necessário condicionar o tráfego normal da via;
- É necessário um número de medições reduzido.

E como desvantagens:

- Os pneus de ensaio podem não ser representativos do tráfego normal da via;
- Não é conhecida a influência do pavimento no ruído geral da passagem de veículos;
- O ruído aerodinâmico e o ruído de tráfego rodoviário normal da via podem constituir factor de incerteza, sobretudo para grandes velocidades de circulação.

5.4 MÉTODO DA PASSAGEM CONTROLADA (CPB) / CARACTERIZAÇÃO DO TRÁFEGO CONDICIONADO

Este método é executado de acordo com a Norma NF S31-119-2: “Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – partie 2: Procédure véhicule maîtrisé”.

Baseia-se na escolha de dois veículos ligeiros e quatro conjuntos de pneus, que servirão de veículos de ensaio. Cada veículo desloca-se a velocidade constante com o motor a trabalhar em condições normais e é efectuada a medição do respectivo nível sonoro máximo, a 7,5 m da via . São necessárias pelo menos 32 medições por pavimento. Em cada medição é controlada a velocidade do veículo, a temperatura do ar, a temperatura do pavimento e a velocidade do vento (NF S31-119-2: 2000) (Fig. 5.5)

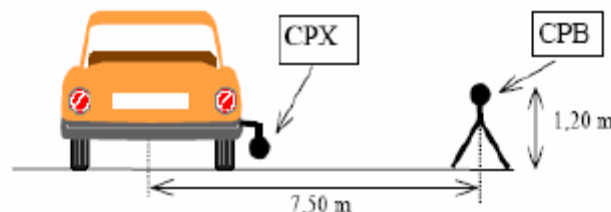


Fig. 5.5 - Método da passagem controlada (CPB) vs. estrada próxima (CPX). (Santos, 2007)

Como principais vantagens podem ser assinaladas:

- A utilização dos mesmos veículos de ensaio diminui a incerteza na determinação da eficácia do pavimento;
- É necessário um menor número de medições.

Como desvantagens:

- Os veículos de ensaio podem não ser representativos do tráfego normal da via;
- O ruído do motor não permite saber exactamente a influência do pavimento no ruído de rolamento;
- Este tipo de ensaio exige condicionamento do tráfego normal da via ou medições apenas em certas horas do dia.

5.5 MÉTODO DA SUPERFÍCIE ESTENDIDA (ESM)

O método da superfície estendida é utilizado na caracterização da absorção sonora. Este método é executado de acordo com a Norma ISO 13472-1:2002 – “Acoustics – Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces In Situ: Extend Surface Method”.

Na caracterização é utilizada uma fonte sonora que emite, no sentido da superfície rodoviária, um som de características normalizadas, sobre um microfone colocado em posição chave para determinar a quantidade de energia sonora absorvida pelo pavimento, o que permite determinar o seu coeficiente de absorção sonora (ISO13472-1: 2002) (Fig. 5.6).

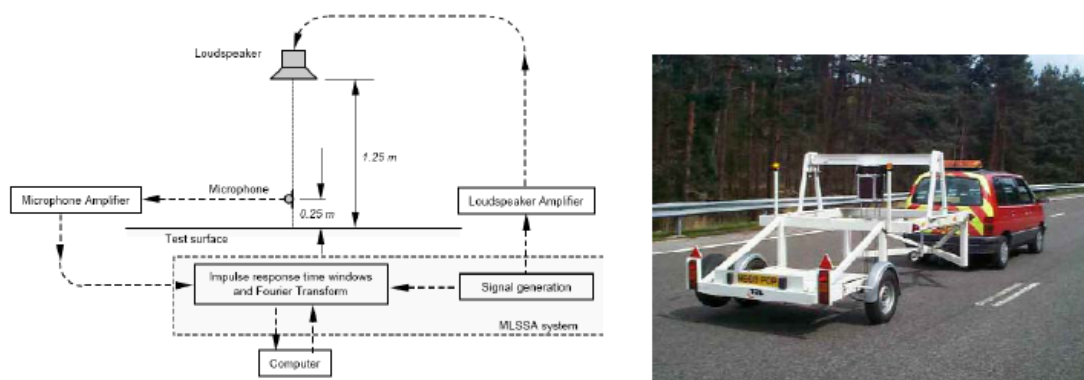


Fig. 5.6- Método da superfície estendida (Santos, 2007)

Este método apresenta como vantagens:

- Saber exactamente o benefício na absorção sonora do pavimento, a qual tem grande influência no desempenho acústico do pavimento;
- Necessidade de um número de medições reduzido.

E como desvantagens:

- Este teste exige condicionamento, pelo menos parcial, do tráfego normal da via ou medições apenas em certas horas do dia;
- Não permite saber a influência do pavimento no ruído geral da passagem dos veículos, nem sequer do ruído da interacção pneu/pavimento.

Quadro 5.1- quadro comparativo das vantagens/desvantagens dos métodos de avaliação de ruído de pavimentos rodoviários

Vantagens /desvantagens	SPB	CPX	CPB	ESM
Necessário condicionar tráfego	não	não	sim	sim
Saber influência do ruído pneu/pavimento	não	sim	não	não
Controlo do tipo de pneus	não	não	sim	não
Controlo do tipo de veículos	sim	não	não	não
Necessidade de muitas medições	sim	não	não	não
Saber ruído geral	sim	não	não	não
Saber absorção sonora do pavimento	não	não	não	sim

6.

RESULTADOS NÚMERICOS

6.1 INTRODUÇÃO AOS RESULTADOS NÚMERICOS

Apresenta-se estudos acústicos comparativos entre os seguintes tipos de pavimentos rodoviários:

Betão Armado Contínuo (BAC);

Betão betuminoso (BB);

Betão betuminoso drenante (BDr);

Betão Betuminoso Rugoso convencional (BBR);

Betuminoso Modificado com Borracha (BMB);

Burlap textured concrete (Longitudinally structured) (CCb);

Dense asphalt concrete (DAC);

Dense graded (HMA);

Double layer porous asphalt (DPAC);

Exposed aggregate concrete (EACC);

Hot Mix Asphalt (HMA);

Microbetões betuminosos rugosos (MBR);

Mistura betuminosa rugosa com betume modificado com borracha (MBR-BMB);

Porous Cement Concrete (PCC);

Portland Cement Concrete Pavement (PCCP);

Single layer porous asphalt (PAC);

Stone mastic asphalt (SMA);

Surface dressings (SD);

Thin layers (TSF).

Vai-se analisar diversos estudos comparativos entre diversos tipos de camadas de desgaste com diferentes idades para se obter os que apresentam melhor desempenho acústico.

6.2. PAVIMENTO BMB VERSUS PAVIMENTO BAC

O estudo de Ruivo e Guerra, 2004 procede-se à caracterização acústica de pavimentos em Betuminoso Modificado com Borracha (BMB) e Betão Armado Contínuo (BAC), e comparam-se os resultados obtidos através do método estatístico de passagem (SPB).

Relativamente ao pavimento BMB, trata-se, de uma mistura betuminosa aberta com betume modificado a partir de borracha reciclada de pneus. O ligante betuminoso utilizado no fabrico da mistura foi um betume 35/50 da CEPISA.

O pavimento de Betão Armado Contínuo (BAC) é um betão armado corrente, rígido e estriado no sentido transversal da via.

No quadro 6.1 são apresentados os níveis sonoros LAeq registados em cada ensaio.

Quadro 6.1 - Níveis sonoros dos pavimentos BMB e BAC, adaptado (Ruivo e Guerra, 2004)

Tipo de Pavimento	BMB	BAC	$\Delta = \text{BAC} - \text{bMB}$
LAeq, em dB (a 20m e 50km/h)	63,3	74,3	11,0
LAeq, em dB (a 20m e 80km/h)	70,9	80,2	9,3
LAeq, em dB (a 20m e 100km/h)	72,6	80,6	8,0

Dos ensaios efectuados conclui-se sobre a vantagem da utilização de pavimento Betuminoso

Modificado com Borracha (BMB) em vias rápidas (do tipo auto-estradas), relativamente ao pavimento de Betão Armado Contínuo (BAC), em termos do ruído gerado pela circulação rodoviária. Conclui-se então, de forma objectiva que existem diferenças médias da ordem de 8 a 11 dB(A) entre os níveis sonoros próprios resultantes da interacção pneus/pavimento de cada revestimento de piso ensaiado.

6.3. PAVIMENTO BMB VERSUS PAVIMENTO BBR

No estudo de Ruivo e Guerra, 2006 procede-se à caracterização acústica de pavimentos em Betuminoso Modificado com Borracha (BMB) e Betão Betuminoso Rugoso convencional (BBR), (Fig. 4.1) e comparam-se os resultados obtidos através do método estatístico de passagem (SPB).

Relativamente ao pavimento BMB, trata-se, de uma mistura betuminosa aberta com betume modificado a partir de borracha reciclada de pneus. O ligante betuminoso utilizado no fabrico da mistura foi um betume 35/50 da CEPESA.

O pavimento de Betão Betuminoso Rugoso convencional (BBR), é utilizado actualmente em grande parte das vias de tráfego como revestimento mais usual e apresenta uma granulometria de 0/14 mm.

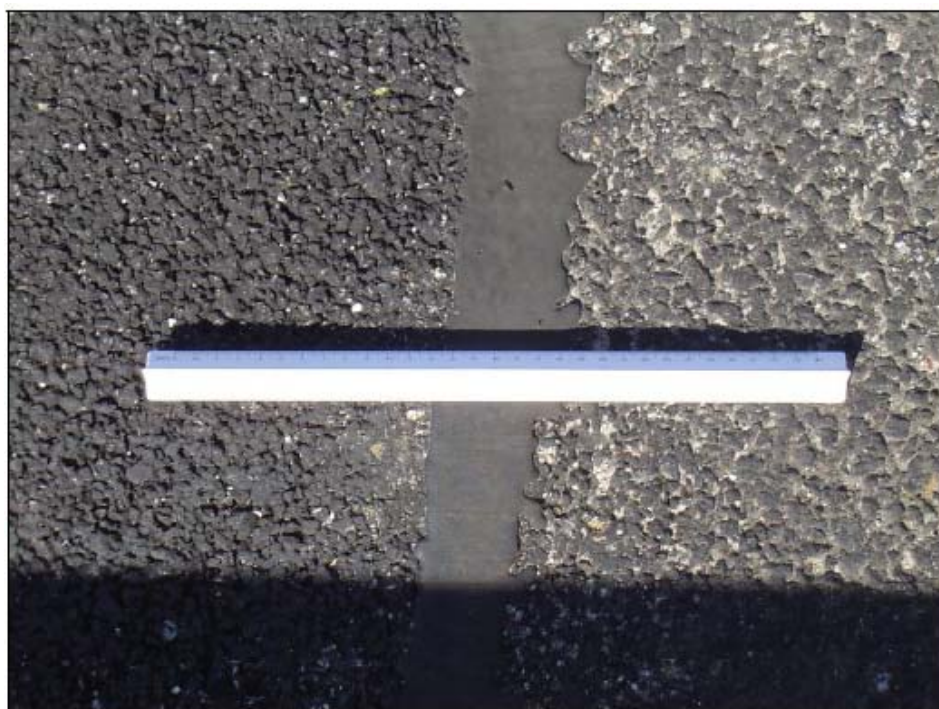


Fig. 6.1 - Pormenor dos pavimentos em Betuminoso Modificado com Borracha, BMB (à esquerda) e Betão Betuminoso Rugoso convencional, BBR (à direita) (Ruivo e Guerra, 2006)

No quadro 6.2 são apresentados os níveis sonoros LAeq registados em cada ensaio.

Quadro 6.2 - Níveis sonoros dos pavimentos BMB e BBR (Ruivo e Guerra, 2004)

Tipo de Pavimento	BMB	BBR	$\Delta = \text{BBR} - \text{BMB}$
LAeq, dB (8,5 m)	73,5	78,6	5,1
LAeq, dB (6,5 m)	73,5	79,1	5,6

Na Fig. 6.2, constata-se que a composição espectral correspondente ao ruído com origem no pavimento BMB apresenta uma redução gradual dos níveis de pressão sonora a partir dos 500 Hz, enquanto que no pavimento BBR essa redução só se verifica a partir dos 1000 Hz.

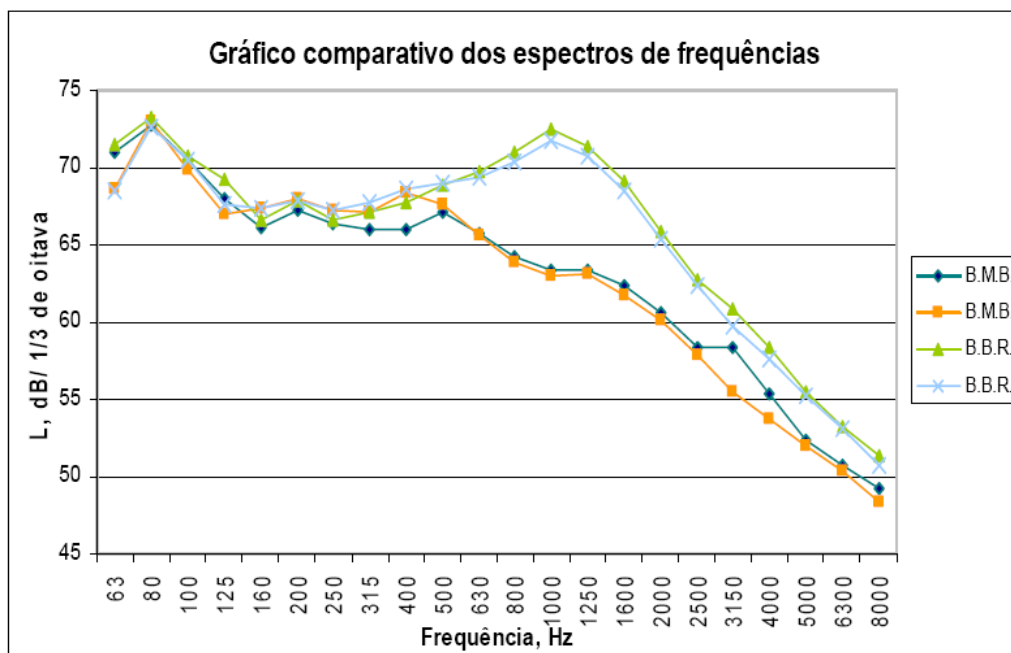


Fig. 6.2 - Comparação dos espectros de frequências de BMB e BBR (Ruivo e Guerra, 2006)

Pelos resultados obtidos conclui-se que, nas mesmas condições de tráfego (volumes, percentagens de pesados, velocidades de circulação e relação de caixa de velocidades), existem diferenças médias da ordem de 5 a 6 dB(A) entre os níveis sonoros globais emitidos em cada revestimento de piso ensaiado, apontando claramente para a vantagem na utilização de camadas de desgaste em BMB, como uma medida eficaz para redução do ruído de tráfego em vias rápidas e para minimização dos impactes acústicos provocados.

6.4. ESTUDO DO KANSAS SOBRE DIVERSOS PAVIMENTOS.

Segundo Douglas (2005), os resultados de diversos ensaios, utilizando o método da estrita proximidade (CPX) e método estatístico de passagem (SPB) são os seguintes:

- Em 201 superfícies de Hot Mix Asphalt (HMA):

- *Open-graded* (fine gradation) mixes - 93 bB(A);
- *Dense graded* HMA - 97 dB(A);
- *Stone Matrix Asphalt Mixes* - 96 dB(A);
- *Open-graded* (coarse gradation) mixes - 97 dB(A).

- Em 43 superfícies de Portland Cement Concrete Pavement (PCCP):

- *Diamond Ground* – 98,1 dB(A);
- *Longitudinally tined* – 98,8 dB(A);
- *Longitudinally grooved* – 101,6 dB(A);
- *Transverse tined* – 102,6 dB(A).

Na Fig. 6.3 apresenta-se o espectro de frequências de algumas superfícies do estudo realizado .

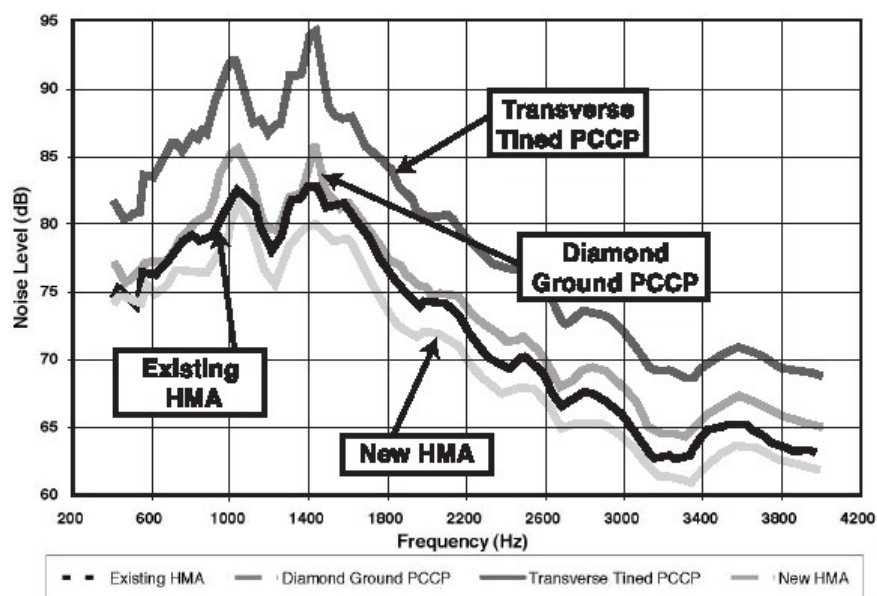


Fig. 6.3 - Espectro de frequências de algumas superfícies testadas, (HMA, Ground PCCP e Diamond Ground PCCP) (Douglas, 2005)

Pelos valores médios do estudo, conclui-se que as superfícies em Betão de cimento Portland (PCCP), qualquer que seja o tratamento superficial, os resultados acústicos são sempre piores.

6.5. ESTUDO PAVIMENTOS DRENANTES E CLÁSSICO PARA AS CONDIÇÕES SECO E MOLHADO.

O estudo de (Freitas *et al.*, 2006) faz-se a comparação entre as superfícies de corrente (Fig. 6.4) e betuminoso drenante, (Fig. 6.5) em seco e molhado utilizando o método Estatístico de passagem (SPB). No quadro 6.3 estão as principais características das camadas superficiais.

Quadro 6.3 - Características das camadas superficiais do betuminoso corrente e betuminoso drenante adaptado (Freitas *et al.*, 2008)

Característica	Betão betuminoso drenante	Betão betuminoso
Dimensão máxima dos inertes	15mm	16mm
Teor em betume	4,5%	5,1%
Profundidade da textura	1,2 -1,6mm	0,7 -1,0mm
Atrito (Pêndulo Britânico)	0,65 - 0,80 BPN	0,65 - 0,70 BPN



Fig. 6.4 - Betão betuminoso corrente (Freitas *et al.*, 2008)



Fig. 6.5- Betão betuminoso drenante (Freitas *et al.*, 2008)

Quadro 6.4 - Quadro final de resultados entre o betuminoso corrente e betuminoso drenante, seco e molhado adaptado (Freitas *et al.*, 2008)

Nível de velocidade	SPBI (dB(A))					
	Molhado		Seco		Molhado - Seco	
	Drenante Clássico		Drenante Clássico		Drenante Clássico	
Média	80,2	83,1	75,8	78,9	4	4
Alta	82,6	86,5	78,4	81,5	4	5
Δ Médias	3		3			
Δ Altas	3		3			

Da análise do quadro 6.4 pode concluir-se que a presença de água na superfície do pavimento provoca um aumento médio do ruído de 4 dB(A).

- O pavimento em betão betuminoso drenante proporciona sempre uma redução de 3 dB(A) comparativamente ao pavimento em betão betuminoso clássico, quer para velocidades médias quer para velocidades altas;

A água, de uma forma geral, aumenta o nível de ruído, embora quando se analisa o espectro de ruído pareça haver uma redução a baixas e médias frequências. Esta redução tem uma importância mais significativa para os veículos pesados. Por sua vez a frequências altas parece haver um aumento significativo (Fig. 6.6).

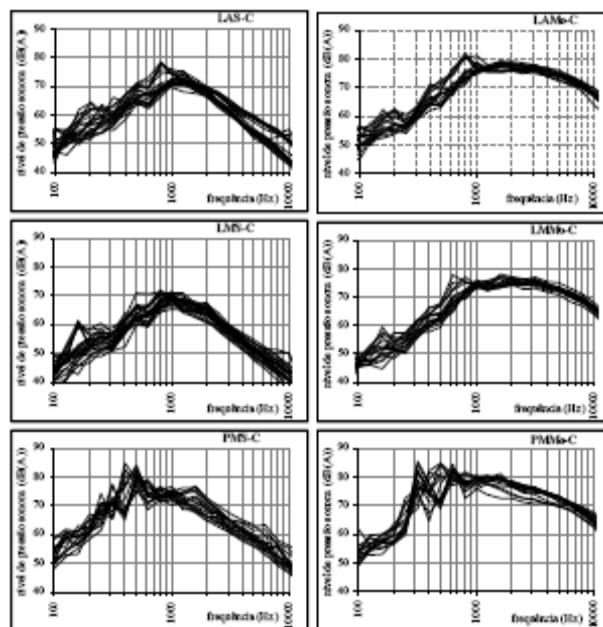


Fig. 6.6- Nível de pressão sonora versus frequência nos pavimentos, em cima: veículos ligeiros e pavimento seco e veículos ligeiros e pavimento molhado, no meio: veículos ligeiros mistos e pavimento seco e veículos ligeiros mistos e pavimento molhado, em baixo: veículos pesados e pavimento seco e veículos pesados e pavimento molhado (Freitas *et al.*, 2008)

6.6. ESTUDO DA REDUÇÃO NO RUÍDO RODOVIÁRIO COM A UTILIZAÇÃO DE PAVIMENTOS DE BAIXO RUÍDO.

O estudo de (Freitas *et al.*, 2008) integrado na reabilitação de uma estrada urbana que tem por objectivo avaliar o impacto no ruído rodoviário da utilização de camadas de desgaste delgadas, de granulometria descontínua optimizada e com betume modificado com polímeros.

Foi utilizado o Método da Proximidade Imediata (*Close ProXimity method*, CPX).

As principais propriedades das misturas utilizadas nas camadas de desgaste são apresentadas no quadro 6.5.

Quadro 6.5 - Propriedades das misturas MA1, MA2 e BB adaptado (Freitas, *et al.*, 2008)

Tipo de camada	Dimensão máxima do agregado (mm)	Percentagem de betume (%)	Volume de vazios* (%)
MA1	8	5,7	15,0
MA2	8	5,7	18,5
BB (0/12)	12	5,1	4,9

Quadro 6.6 - Nível de ruído para as velocidades de referência adaptado (Freitas, *et al.*, 2008)

Tipo de veículo	Velocidade (km/h)	Nível de ruído (dB(A))				
		MA1	BB1	BB2	MA2	Max-Min
Ligeiros	50	81,0	83,8	82,7	80,9	2,9
	80	87,4	90,5	90,0	87,1	3,1
	100	91,8	95,0	95,0	91,3	3,3

Os níveis de ruído medidos em campo próximo, quadro 6.6, 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 100 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, o facto da textura superficial ser ligeiramente diferente explica a variação de resultados a velocidades mais baixas.

O espectro de ruído de emissão correspondente a vários tipos de superfícies é mostrado na Figura 6.7, observa-se uma diferença de cerca de 1 dB entre as misturas BB e cerca de 5 dB entre as DA e MA, para as bandas de frequência compreendidas entre os 800 Hz e os 2500 Hz. Este resultado mostra o ótimo desempenho das camadas finas de desgaste, MA.

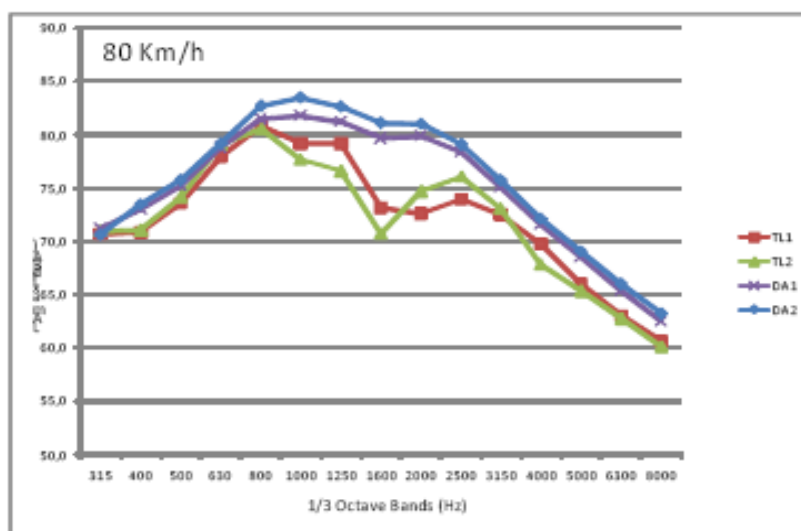


Fig. 6.7- Espectro do ruído medido com o sistema CPX para diferentes tipos de pavimentos à velocidade de 80 km/h (Freitas, *et al.*, 2008)

6.7. ESTUDO DA AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ACÚSTICO DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.

No estudo, (Freitas *et al.*, 2008) que se apresenta resulta da reunião de dados de vários estudos de avaliação do ruído rodoviário realizados por diversos métodos de ensaio, quer em estradas nacionais quer em auto-estradas.

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).

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 (quadro 6.7):

a) 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.

b) Betão betuminoso drenante (BDr):

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

c) 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).

Resultados pelo método (CPB), nas velocidades de 57, 70 e 90 km/h nas figuras 6.8, 6.9 e 6.10.

Quadro 6.7 - Propriedades das misturas adaptado (Freitas, *et al*, 2008)

Superfície	Profundidade da textura (mm)	Idade da data do ensaio (anos)
S1(BB12)	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

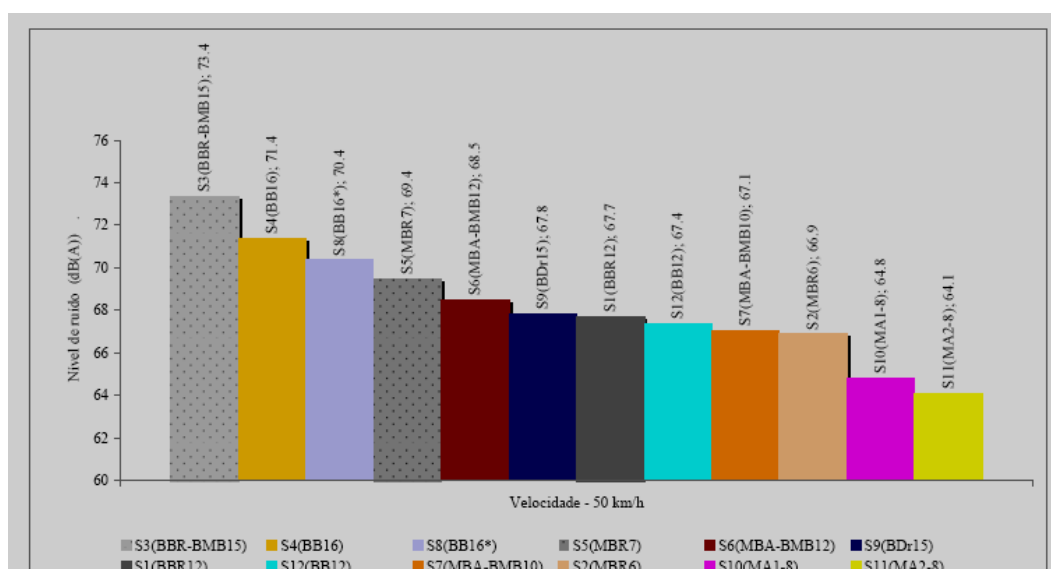


Fig. 6.8 - Nível máximo de ruído a 50 km/h (CPB) (Freitas *et al.*, 2008)

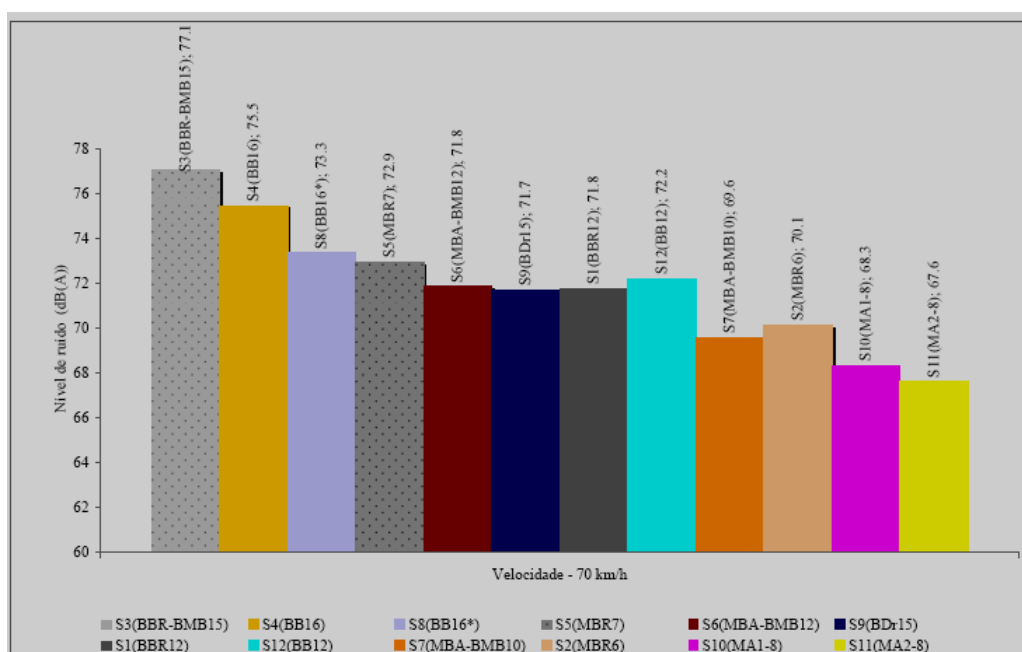


Fig. 6.9 - Nível máximo de ruído a 70 km/h (CPB) (Freitas *et al.*, 2008)

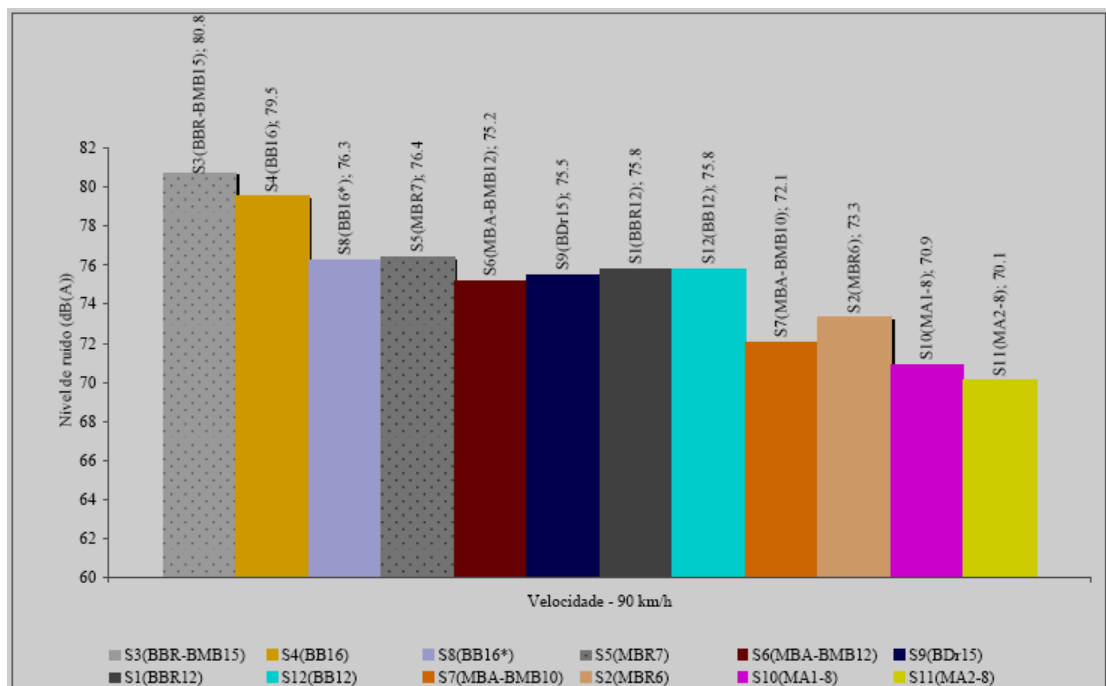


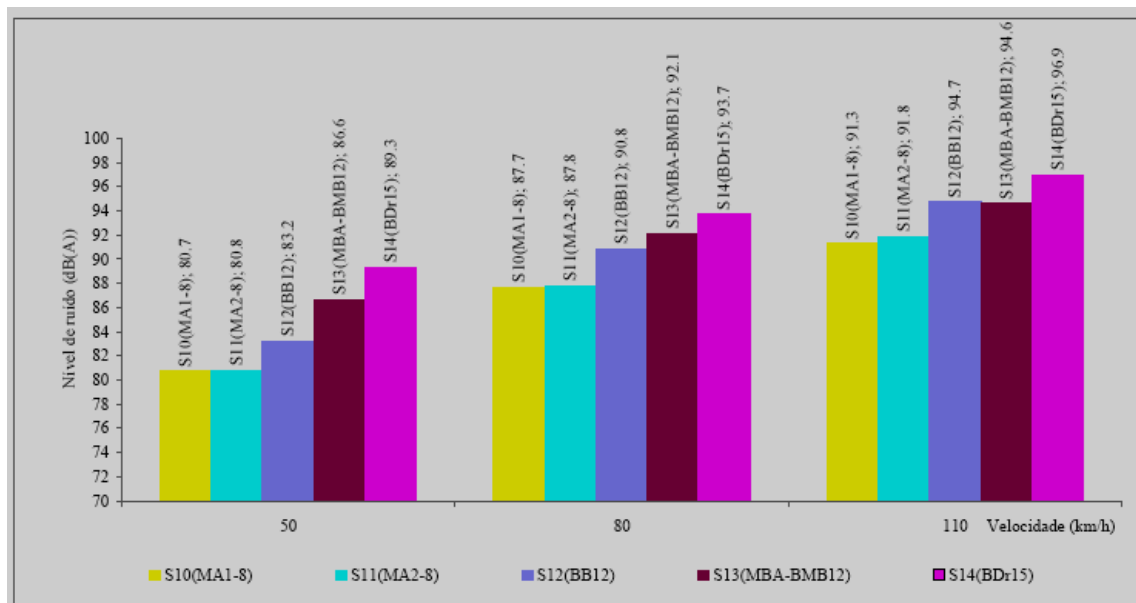
Fig. 6.10- Nível máximo de ruído a 90 km/h (CPB) (Freitas *et al.*, 2008)

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

- o primeiro grupo, de desempenho fraco, caracteriza-se por uma dimensão elevada dos agregados (superfícies S3, S4 e S8);
- 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;
- 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 90km/h.

As superfícies avaliadas pelo método CPX foram apenas cinco: superfícies S10 a S14. Na Figura 4.11, são apresentados níveis máximos de ruído para as velocidades de ensaio de 50, 80 e 110 km/h.

Fig. 6.11- Nível máximo de ruído (CPX), (Freitas, *et al*, 2008)

Os ensaios realizados pelo método CPX mostraram que os resultados são menos sensíveis às variações das características das superfícies do que os resultados obtidos pelo método CPB, mostrando ser menos adequado para a classificação das superfícies. O método CPX, dado ser um método de medição em campo próximo, caracteriza melhor os mecanismos de interação pneu/pavimento.

6.8. ESTUDO DE “EFFECTS OF DIAMOND GRINDING AND GROOVING ON TIRE/PAVEMENT NOISE”

O estudo (Dare *et al*, 2007) faz-se a análise comparativa acústica dos métodos de *diamond grinding* e *grooving* na execução das superfícies de betuminoso de cimento Portland.

Estes métodos são frequentemente usados, na reabilitação de pavimentos de betuminoso de cimento Portland e ambos os métodos utilizam lâminas para remover parte da superfície, quadro 5.8, proporcionando uma megatextura para melhorar o atrito e tornar o pavimento mais silencioso.

A diferença entre *grinding* e *grooving* é que o primeiro proporciona uma superfície não uniforme enquanto que a segunda é uniforme, conforme mostra a figura 6.12 das superfícies em estudo.

Quadro 6.8 - Sequência da utilização das lâminas (Dare et al , 2007)

Sample	First pass	Second pass	Third pass
Convencional diamond grind	4,19mmblade 3,81mmspacer 3,18mmdeep		
Double chopper	4,19mmblade 0,76mmspacer chopper blade 0,76mmspacer chopper blade 0,76mmspacer 3,18mmdeep		
Triple chopper	4,19mmblade 0,76mmspacer chopper blade 0,76mmspacer chopper blade 0,76mmspacer chopper blade 0,76mmspacer 3,18mmdeep		
Blank	None		
Blank with grooves	2,29mmblades 12mm on center 3,18mmdeep		
Full grind	2,29mmblade 2,29mmspacer 6,35mmdeep	2,29mmblade 2,29mmspacer 6,35mmdeep Grinding head shifted by 2,29mm	
Full grind with grooves	2,29mmblade 2,29mmspacer 3,18mmdeep	2,29mmblade 2,29mmspacer 3,18mmdeep Grinding head shifted by 2,29mm	2,29mmblades 12,7mm on center 3,18mmdeep from full grind level



Fig. 6.12 - Superfícies, linha de cima da esquerda para a direita: *Conventional grind*; *Double chopper blade*; *Triple chopper blade*. linha do meio da esquerda para a direita: *Blank*; *Blank with grooves*; *Full grind*. Linha de baixo : *Full grind with grooves* (Dare et al. , 2007).

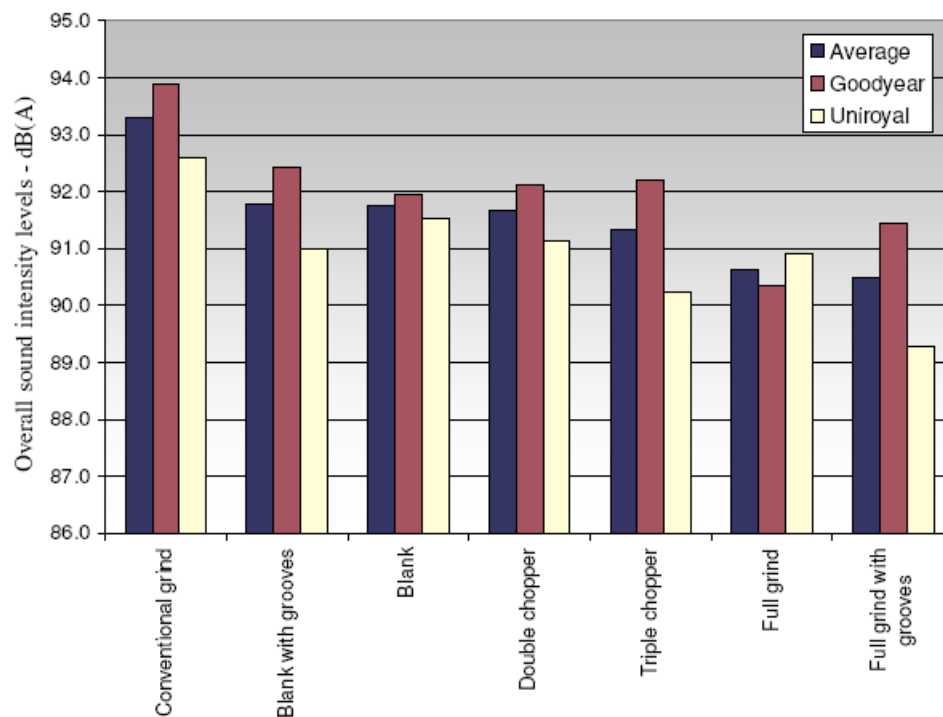


Fig. 6.13 - Resultados finais do nível de ruído das superfícies *diamond grinding* e *grooving* com dois tipos de pneus e a média entre nível de ruído dos dois tipos de pneus (Dare et al., 2007)

As superfícies que se revelaram mais silenciosas, foram ; *Full grind*.e *Full grind with grooves* o que prova que o tipo de macrotextura tem importância na diminuição do ruído, mas constatou-se a importância do tipo de pneu.(Fig. 6.13)

Apesar de tudo, comparando com a superfície tradicional este método de tratamento de superfície de betuminoso de cimento Portland, não se revela muito eficaz na redução do ruído pois a melhor superfície não chegou a uma redução de 3 dB(A).

6.9. ESTUDO DE DA REDUÇÃO DE RUÍDO EM SUPERFÍCIES DE BAIXO RUÍDO

No estudo (ECE, 2007) é feita a comparação entre diversas superfícies silenciosas (Fig. 6.14) no Japão, em que foram analisadas as superfícies apresentadas no quadro 6.9.

Quadro 6.9 - Características das superfícies *two layer drainage pavement*, *one layer drainage pavement*, *porous elastic pavement* e *dense asphalt pavement*, testadas no Japão (ECE, 2007)

Road surfaces	Max. Chipping size	Thickness	Remarks
Dense asphalt	13 mm	50mm	Conventional road in Japan
One layer drainage	13 mm	50mm	Practical use
Two layer drainage	Upper: 5 mm Lower: 13 mm	Upper: 20 mm Lower: 30 mm	Partial use
Porous elastic	-	20 mm	Under development for practical use

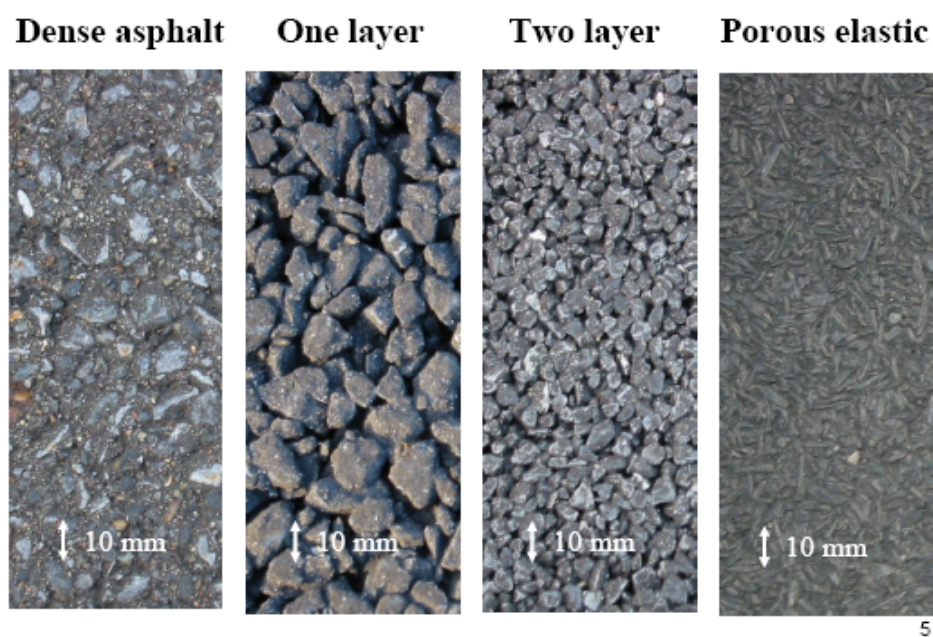


Fig. 6.14 - Vista de cima das superfícies *two layer drainage pavement*, *one layer drainage pavement*, *porous elastic pavement* e *dense asphalt pavement*, testadas no Japão (ECE, 2007)

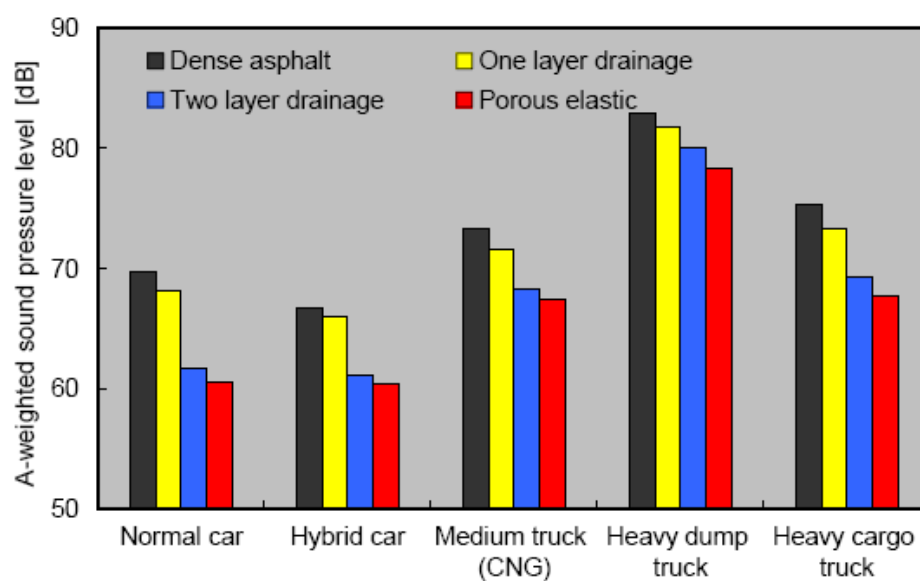


Fig. 6.15 - Valores finais de ruído a velocidade constante de 60 km/h, das superfícies *two layer drainage pavement*, *one layer drainage pavement*, *porous elastic pavement* e *dense asphalt pavement*, testadas no Japão (ECE, 2007)

A redução de ruído dos pavimentos “two layer drainage pavement” e “porous elastic pavement” e o “dense asphalt pavement” é entre 5 to 8 dB(A), para a velocidade constante de 60 km/h (Fig. 6.15).

6.10. ESTUDO DE “ACOUSTIC PERFORMANCE OF LOW-NOISE ROAD PAVEMENTS”

O estudo (Andersen, 2005) faz-se a avaliação acústica de diversos tipos de pavimentos, quadro 6.10, utilizados na Europa.

Pode-se concluir através dos quadros 6.11 a 6.23, que o nível de ruído aumenta em função da velocidade e do tipo de veículo, automóveis ligeiros, pesados de duplo eixo e pesados de múltiplos eixos.

Quadro 6.10 - Abreviaturas usadas para os tipos de pavimentos em estudo (Andersen, 2005)

Pavement type	Name
Dense asphalt concrete	DAC
Single layer porous asphalt	PAC
Double layer porous asphalt	DPAC
Thin layers	TSF
Stone mastic asphalt	SMA
Hot rolled asphalt	HRA
Surface dressings	SD
Exposed aggregate concrete	EACC
Burlab textured concrete (Longitudinally structured)	CCb
Porous Cement Concrete	PCC
Guess asphalt (German type)	MA

Avaliação acústica de diversos tipos de pavimentos, para veículos ligeiros (quadro 6.11).

Quadro 6.11 - Níveis de ruído para velocidades 50, 80 e 110 km/h adaptado (Andersen, 2005)

Cars - km/h	Number of measurements	avg- L _{pmax}
SMA, cars-50	6	70,6
TSF, cars-50	6	65,8
DAC or DACo, cars-50	22	70,4
DPAC, cars-50	18	66,7
SD, cars-50	2	74,0
CC or COb, cars-50	2	75,6
Paving stones, cars-50	1	79,6
SMA, cars-80	5	78,7
DAC, cars-80	6	78,8
DPAC, cars-80	4	69,6
EACC, cars-80	2	75,6
PAC, cars-80	2	76,1
PCC, cars-80	2	74,5
TSF, cars-80	2	72,4
Slurry seal, cars-80	1	78,4
COb, cars-110	10	84,6
DAC, cars-110	5	82,0
DPAC, cars-110	4	78,0
EACC, cars-110	6	83,9
HRA, cars-110	8	86,3
MA(guss-), cars-110	4	81,9
PAC, cars-110	4	79,1
PCC, cars-110	4	77,1
SMA, cars-110	11	82,2
TSF, cars-110	7	82,3
SD, cars-110	2	87,8

O que apresentou melhor desempenho como pavimento silencioso foi o DPAC (Duas camadas porosas, drenante), para as velocidades de 50, 80 e 100km/h testadas (quadro 6.11).

Avaliação acústica de diversos tipos de pavimentos, para veículos pesados de duplo eixo (quadro 6.12).

Quadro 6.12 - Níveis de ruído para velocidades 50, 70 e 85 km/h adaptado (Andersen, 2005)

Dual-axle trucks - km/h	Number of measurements	avg- L _{pmax}
CC or CCb, dual-ax-50	2	83,0
DAC dual-ax-50	15	77,8
SD dual-ax-50	2	79,7
SMA dual-ax-50	6	79,1
TSF, dual-ax-50	3	77,1
Paving stones, dual-ax-50	1	83,2
DAC, dual-ax-70	1	83,1
SMA, dual-ax-70	1	81,9
Slurry seal, dual-ax-70	1	84,1
CCb, dual-ax-85	9	87,4
DAC, dual-ax-85	5	85,8
DPAC, dual-ax-85	4	81,8
EACC, dual-ax-85	6	85,6
HRA, dual-ax-85	8	87,0
MA(guss-), dual-ax-85	4	82,3
PAC, dual-ax-85	4	82,1
PCC, dual-ax-85	3	80,1
SD, dual-ax-85	2	87,3
SMA, dual-ax-85	10	85,2
TSF, dual-ax-85	7	84,2

Os que apresentaram melhor desempenho como pavimento silencioso, (quadro 6.12), foram o DPAC (Duas camadas porosas, drenante) e o PCC, para as velocidades de 85 km/h, a velocidade determinante para a produção de ruído nos veículos pesados.

Avaliação acústica de diversos tipos de pavimentos, para veículos pesados de múltiplos eixos (quadro 6.13).

Quadro 6.13 - Níveis de ruído para velocidades 50, 70 e 85 km/h adaptado (Andersen, 2005)

Multi-axle trucks - km/h	Number of measurements	avg- L _{pmax}
CC or COb, multi-ax-50	2	82,2
DAC multi-ax-50	7	80,9
SD multi-ax-50	2	82,6
SMA multi-ax-50	3	81,6
Paving stones, multi-ax-50	1	85,6
DAC, multi-ax-70	1	89,2
SMA, multi-ax-70	1	86,8
Slurry seal, multi-ax-70	1	85,9
COb, multi-ax-85	10	90,1
DAC, multi-ax-85	6	87,9
DPAC, multi-ax-85	4	82,5
EACC, multi-ax-85	6	87,4
HRA, multi-ax-85	8	89,0
MA(guss-), multi-ax-85	4	86,0
PAC, multi-ax-85	4	85,2
PCC, multi-ax-85	4	83,5
SD, multi-ax-85	2	89,5
SMA, multi-ax-85	11	88,3
TSF, multi-ax-85	7	85,8

Conforme o quadro anterior, o que apresentou melhor desempenho como pavimento silencioso foi o DPAC (Duas camadas porosas, drenante), para as velocidades de 85 km/h, a velocidade determinante para a produção de ruído nos veículos pesados.

Nos quadros 6.14 a 6.24, temos o nível de ruído em função da velocidade e do tipo de veículo (automóveis ligeiros, pesados de duplo eixo e pesados de múltiplos eixos), para cada superfície estudada.

Quadro 6.14 - Níveis de ruído para *dense asphalt concrete* (DAC) adaptado (Andersen, 2005)

Dense asphalt concrete - km/h	Number of measurements	avg- L _{pmax}
DAC or DACo, cars-50	22	70,4
DAC, cars-80	6	78,8
DAC, cars-110	5	82,0
DAC, dual-ax-50	15	77,8
DAC, dual-ax-70	1	83,1
DAC, dual-ax-85	5	85,8
DAC, multi-ax-50	7	80,9
DAC, multi-ax-70	1	89,2
DAC, multi-ax-85	6	87,9

Quadro 6.15 - Níveis de ruído para SMA adaptado (Andersen, 2005)

SMA - km/h	Number of measurements	avg- L _{pmax}
SMA, cars-50	6	70,6
SMA, cars-80	5	78,7
SMA, cars-110	11	82,2
SMA, dual-ax-50	6	79,1
SMA, dual-ax-70	1	81,9
SMA, dual-ax-85	10	85,2
SMA, multi-ax-50	3	82,6
SMA, multi-ax-70	1	86,8
SMA, multi-ax-85	11	88,3

Quadro 6.16 - Níveis de ruído para *Guss asphalt* (MA) adaptado (Andersen, 2005)

Guss asphalt - km/h	Number of measurements	avg- L_{pmax}
MA (guss-), cars-110	4	81,9
MA, dual-ax-85	4	82,3
MA, multi-ax-85	4	86,0

Quadro 6.17 - Níveis de ruído para *Hot rolled asphalt* (HRA) adaptado(Andersen, 2005)

Hot rolled asphalt - km/h	Number of measurements	avg- L_{pmax}
HRA, cars-110	8	86,3
HRA, dual-ax-85	8	87,0
HRA, multi-ax-85	8	89,0

Quadro 6.18 - Níveis de ruído para *surface dressing* (SD) adaptado (Andersen, 2005)

Surface dressing - km/h	Number of measurements	avg- L_{pmax}
SD, cars-50	2	74,0
SD, cars-110	2	87,8
SD, dual-ax-50	2	79,7
SD, dual-ax-85	2	87,3
SD, multi-ax-50	2	82,6
SD, multi-ax-85	2	89,5

Quadro 6.19- Níveis de ruído para *slurry seal* adaptado (Andersen, 2005)

Slurry seal - km/h	Number of measurements	avg- L_{pmax}
Slurry seal, cars-80	1	78,4
Slurry seal, dual-ax-70	1	84,1
Slurry seal, multi-ax-70	1	85,9

Quadro 6.20 - Níveis de ruído para *porous pavement* (PAC) adaptado (Andersen, 2005)

Porous pavement - km/h	Number of measurements	avg- L_{pmax}
PAC, cars-50	2	76,1
PAC, cars-110	4	79,1
PAC, dual-ax-85	4	82,1
PAC, multi-ax-85	4	85,2

Quadro 6.21 - Níveis de ruído para *two layer porous pavement* (DPAC) adaptado (Andersen, 2005)

Two layer porous pavement - km/h	Number of measurements	avg- L_{pmax}
DPAC, cars-50	18	66,7
DPAC, cars-80	4	69,6
DPAC, cars-110	4	78,0
DPAC, dual-ax-85	4	81,8
DPAC, multi-ax-85	4	82,5

Quadro 6.22 - Níveis de ruído para *cement concrete including burlap type* (CCb) (Andersen, 2005)

Cement concrete burlap type - km/h	Number of measurements	avg-L_{pmax}
CC or CCb, cars-50	2	75,6
CCb, cars-110	10	84,6
CC or CCb, dual-ax-50	2	83,0
CCb, dual-ax-85	9	87,4
CC or CCb multi-ax-50	2	82,2
CCb, multi-ax-85	10	90,1

Quadro 6.23 - Níveis de ruído para *porous cement concrete* (PCC) adaptado (Andersen, 2005)

Porous cement concrete - km/h	Number of measurements	avg-L_{pmax}
PCC, cars-80	1	74,5
PCC, cars-110	1	77,1
PCC, dual-ax-85	1	80,1
PCC, multi-ax-85	1	83,5

Quadro 6.24 - Níveis de ruído para *paving stones* adaptado (Andersen, 2005)

Paving stones - km/h	Number of measurements	avg-L_{pmax}
Paving stones, cars-50	1	79,6
Paving stones, dual-ax-50	1	83,2
Paving stones, multi-ax-50	1	85,6

Da análise dos quadros anteriores, o pavimento que apresentou melhor desempenho como pavimento silencioso foi o DPAC (Duas camadas porosas, drenante), para as velocidades de 50, 85 e 110 km/h, nos diferentes tipos de veículos sendo as maiores diferenças verificadas nos níveis de ruído dos veículos ligeiros.

7.

CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

7.1. CONCLUSÕES

O ruído causado pelo tráfego, em estradas de acima dos 35 km/h, deve-se essencialmente à interacção entre os pneus dos veículos e as camadas superficiais dos pavimentos. Estas últimas são claramente um factor de grande influência, pelo que, diversos estudos têm sido realizados para melhorar cada vez mais as suas características, métodos de aplicação e, conseqüentemente, implementar novas alternativas que gradualmente as vão tornando cada vez mais silenciosas.

Com base nos estudos elaborados pelo grupo de trabalho WP4 do projecto Europeu SILVIA (*SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control*), pode-se concluir que foram atingidos progressos significativos, no que respeita a camadas de superfície silenciosas, já que para condições muito favoráveis, foram registadas reduções iniciais de ruído de cerca de 10 dB(A) em relação a uma superfície de referência. No entanto, deve ter-se em atenção que a redução conseguida sofrerá um decréscimo ao longo do tempo. As superfícies de estrada porosas encontram-se mais associadas a níveis inferiores de ruído pneu/pavimento, do que as superfícies não porosas. A complexidade destes mecanismos é considerável mas, essencialmente, a redução de ruído observada pode ser relacionada com a porosidade da superfície e com a espessura da camada.

De acordo com os resultados obtidos, podemos concluir que o pavimento incorporando betume modificado com borracha de pneus reciclado, apresenta vantagem importantes relativamente ao pavimento rígido em betão armado contínuo e mesmo em relação ao pavimento flexível tradicional, pelo que será mais uma solução a considerar na minimização do ruído originado pelo tráfego rodoviário.

Sendo o pavimento poroso de duas camadas o que apresentou melhores resultados em diversos ensaios, conclui-se destes que com um aumento de velocidade de 50 km/h para 110 km/h, o aumento do nível sonoro chega a ultrapassar os 12 dB(A), apesar de em pavimentos tradicionais o aumento normalmente não ser tão elevado, será de considerar em zonas sensíveis haver uma política de limitação da velocidade máxima.

Dos ensaios de tratamento superficial de betumes de cimento Portland, conclui-se que a redução sonora foi pouco significativa, pois foi inferior a 3 dB(A).

7.2. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Dada a utilização crescente de pavimentos silenciosos em Portugal e face à existência de poucos estudos devido à sua utilização recente, que comprovem a eficácia efectiva deste tipo de pavimentos na redução do ruído ao longo do tempo, seria importante desenvolver-se este estudo nessa direcção.

A aplicação das normas de classificação de pavimentos, existentes e futuras vão permitir uma melhor investigação em todo o mundo, permitindo que um estudo deste tipo, com comparações entre os pavimentos de diversos países, uma falha neste estudo, seja já possível nos países da União Europeia e nos países mais desenvolvidos.

Outra direcção possível seria uma análise de custo/benefício entre a utilização de pavimentos de baixo ruído e outras formas de obter essa redução.

A utilização de métodos de previsão no projecto utilizando tecnologias de informação para adequar o pavimento à sua utilização específica.

Também seria de abordar a durabilidade dos novos pavimentos de baixo ruído.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, Teresa Sofia Figueiredo, *Metodologias de auscultação de pavimentos rodoviários aplicação prática do radar de prospecção e do deflectómetro de impacto*, Dissertação para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Civil Instituto Superior Técnico, 2007

Andersen, B, Larsen L E, Bendtsen, H, , *Acoustic Performance of Low-Noise Road Pavements* SILVIA PROJECT REPORT, 2005

Batista, Fátima Alexandra Antunes, *Novas técnicas de reabilitação de pavimentos – Misturas betuminosas densas a frio*, tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004

Bernhard Robert J, *European Study on Quiet Pavement: Findings about Asphalt Pavements*, A Report of Federal Highway Administration (FHWA) e American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2005

Bernhard, Robert J., Dare, Tyler P., Thornton, William D., *Effects of diamond grinding and grooving on tire/pavement noise*, NOISE-CON 2007, Reno, Nevada, 2007

Branco, Fernando; Pereira, Paulo e Santos, Luís Picado, *Pavimentos Rodoviários*, edições Almedina, 2006

CALM II Network, *Research for a Quieter Europe in 2002*, Updated Strategy Paper of the - 2007

Carvalho, A. P. Oliveira de, *Acústica ambiental de edifícios*. Textos de apoio à disciplina de Acústica ambiental de edifícios, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006

Company, Ford Motor, www.ford.com, 2009

Douglas I. Hanson, Robert S. James, Brian Waller, *Kansas Tire / Pavement Noise Study*, National Center for Asphalt Technology (NCAT), 2005

ECE, *Road vehicle noise reduction by low noise road surfaces in Japan* ECE-TRANS-WP29-GRB-45-inf02e 2007

Ejsmont, Jerzy A. e Ronowski Grzegorz i, *LABORATORY TESTS OF POROELASTIC ROAD SURFACES*, 16th International Congress on Sound and Vibration, Kraków, Poland, 2009

FEHRL Report, *Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surface*, 2006

Freitas, E., J. P. Paulo, Coelho, J. L. Bento, *A redução no ruído rodoviário com a utilização de pavimentos de baixo ruído*, 20 - 22 de Outubro, Coimbra, Portugal Acústica, 2008

Freitas, E., J. P. Paulo, Coelho, J. L. Bento, *Avaliação do desempenho acústico de pavimentos rodoviários*, 20 - 22 de Outubro, Coimbra, Portugal Acústica 2008

ISO 11819-1: “Acoustics – measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: statistical pass-by method”, Genève, Switzerland.

ISO 11819-2: “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close – Proximity method”

ISO 13472-1 – “Acoustics – Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces In Situ: Extend Surface Method”

NF S31-119-2: “Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – partie 2: Procédure véhicule maîtrisé”

Pinto, Isabel Batista Rua, *Caracterização superficial de pavimentos rodoviários*, tese de mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003

Ruivo, Fernando Palma, e Guerra, Carlos, *Relatório de ensaios de pavimento BMB versus pavimento BAC*, Autoestradas do Atlântico, 2004

Ruivo, Fernando Palma, e Guerra, Carlos, *Relatório de ensaios de pavimento BMB versus pavimento BBR.*, Autoestradas do Atlântico, 2004

Santos, Adriana Paula da Silva, *Estudo da eficácia na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes*, tese de mestrado, Universidade do Minho, 2007

Silva, Hugo Manuel Ribeiro Dias da, *CARACTERIZAÇÃO DO MASTIQUE BETUMINOSO E DA LIGAÇÃO AGREGADO-MASTIQUE Contribuição para o Estudo do Comportamento das Misturas Betuminosas*, Universidade do Minho, escola de engenharia, tese de doutoramento, 2005