

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Adriana Paula da Silva Santos

**ESTUDO DA EFICÁCIA
NA REDUÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO
EM PAVIMENTOS DRENANTES**

Tese de Mestrado
Mestrado em Engenharia Rodoviária

Trabalho efectuado sob a orientação
Doutora Elisabete Fraga de Freitas
Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

DECLARAÇÃO

ADRIANA PAULA DA SILVA SANTOS

ENDEREÇO ELECTRÓNICO: asantos@aenor.pt

TELEFONES: 229 997 490

NÚMERO DO BILHETE DE IDENTIDADE: 11 763 966

917 843 525

TÍTULO DA TESE DE MESTRADO:

ESTUDO DA EFICÁCIA NA REDUÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO EM PAVIMENTOS DRENANTES

ORIENTADORES: Doutora Elisabete Fraga de Freitas
Professor Doutor Luís Guilherme de Picado Santos

MESTRADO EM ENGENHARIA RODOVIÁRIA

ANO DE CONCLUSÃO: 2007

É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA TESE/TRABALHO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE;

Universidade do Minho, 22 de Março de 2007

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido com base no Protocolo estabelecido entre a Universidade do Minho e a Concessionária AENOR – Auto-Estradas do Norte, S.A., sob orientação da Doutora Elisabete Fraga de Freitas, Professora Auxiliar da Universidade do Minho e do co-orientador Doutor Luís Picado Santos, Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Coimbra.

Todas as condições de base inerentes a este trabalho foram facultadas pelas empresas AENOR, S.A. e MOTA-ENGIL, S.A.

Assim, expresso os meus agradecimentos às seguintes Pessoas e Entidades:

À Doutora Elisabete Fraga de Freitas, pela permanente disponibilidade, elevado interesse e persistente empenho na orientação da presente tese;

Ao Professor Doutor Luís de Picado Santos, pela análise crítica e construtiva nos momentos determinantes deste trabalho;

À AENOR – Auto-Estradas do Norte, S.A., Concessionária do lanço “SCUT do Grande Porto”, local onde se realizaram todos os ensaios deste trabalho, pelo investimento nesta tese e por todo o apoio prestado;

À MOTA-ENGIL S.A., pelo tempo de obra facultado e pelos equipamentos e quadros técnicos disponibilizados para a realização exclusiva deste trabalho;

Aos colegas e amigos que colaboraram de forma empenhada na realização de inúmeras tarefas de campo e de escritório, sem as quais não seria possível concluir esta tese.

ESTUDO DA EFICÁCIA NA REDUÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO EM PAVIMENTOS DRENANTES

RESUMO

A qualidade ambiental preconizada na legislação europeia, no que respeita ao ruído produzido pelo tráfego rodoviário, é cada vez mais exigente. Por sua vez, a experiência portuguesa no domínio da avaliação do ruído rodoviário e o conhecimento dos factores que o determinam ainda são insuficientes para satisfazer os requisitos europeus. Deste modo, torna-se imprescindível conhecer esses factores e determinar a eficácia das diferentes superfícies rodoviárias na redução do ruído.

Portugal tem vindo a desenvolver estudos para caracterizar os níveis sonoros em diferentes tipos de pavimentos, tais como o pavimento em betão armado, o pavimento rugoso e o pavimento betuminoso modificado com borracha. Porém, não existe ainda para a realidade portuguesa uma ampla experiência na avaliação da eficácia da redução dos níveis sonoros em pavimentos de betão betuminoso drenante (BD) e de betão betuminoso “clássico” (BC), especialmente sob a influência do parâmetro “água”. Deste modo, este estudo tem por objectivo verificar a eficácia na redução dos níveis sonoros – resultantes da circulação automóvel – num pavimento em betão betuminoso drenante, por oposição a um pavimento em betão betuminoso “clássico” (BC), para as condições seco e molhado.

Para isso, considerou-se dois trechos consecutivos, integrados num lanço da A41/IC24 da Concessão da “Scut do Grande Porto”, um com camada de desgaste em betão betuminoso drenante e outro com camada em betão betuminoso. A avaliação dos níveis sonoros em cada um dos trechos foi realizada pelo Método Estatístico de Passagem.

Atendendo a que o ruído devido à interacção pneu/pavimento se reveste de uma grande importância, em paralelo, foram efectuadas medições, nos pavimentos em estudo, aplicando o Método do motor desligado.

A análise dos resultados é apresentada sob três abordagens, as quais se baseiam no índice estatístico de passagem, nos níveis de pressão sonora e nos espectros de frequência. Assim, verificou-se que, independentemente do tipo de veículo, pneu e da velocidade de circulação, o pavimento drenante atingiu sempre níveis sonoros de ruído inferiores, sendo que o pavimento drenante na condição seco, foi o mais silencioso na ordem de 3 a 4 dB(A).

ESTUDO DA EFICÁCIA NA REDUÇÃO DO RUÍDO DE TRÁFEGO EM PAVIMENTOS DRENANTES

PALAVRAS CHAVE

Ruído

Interacção pneu / pavimento

Mistura betuminosa drenante

Método Estatístico de Passagem

Método do Motor Desligado

Seco / Molhado

Pneu

STUDY OF THE EFFICIENCY IN TRAFFIC NOISE REDUCTION ON DRAINING PAVEMENTS

ABSTRACT

The environmental quality established under the European law with regard to traffic noise has become increasingly demanding. On the other hand, the Portuguese experience in the domain of road noise assessment, as well as the knowledge of the factors that determine it are still insufficient to satisfy the European requirements. Thus, it is essential to know those factors and to determine the efficiency of the various road surfaces in relation to noise reduction.

Portugal has been developing studies with the goal to characterize sound levels in different types of pavement, such as reinforced concrete pavement, coarse pavement and rubber modified bituminous pavements. Nevertheless, Portuguese reality does not comprise a wide experience in assessing the efficiency of sound level reductions over BD and BC pavements, especially under the influence of the “water” parameter. Thus, the aim of this study is to check the efficiency of reducing noise levels – from road traffic – of a porous asphalt concrete pavement (BD) in comparison to a “classic” asphalt concrete pavement (BC), under wet and dry conditions.

For this purpose, two consecutive road sections in A41/IC24, at “Grande Porto Concession”, were considered, one of which with porous asphalt concrete wearing course and the other with asphalt concrete layer. The measurement of the noise levels at each of those sections was performed with the Statistical Pass-By Method.

Considering the importance of the interaction tyre/pavement on road noise, measurements with the Coast-by Method were also carried out at those pavements.

The analysis of these results is presented in three approaches based on statistical pass-by index, sound pressure levels, and frequency spectres. Regardless of the vehicle type, tyre or travelling speed, the drainage pavement reached inferior noise levels every time and under dry conditions this was the most silent pavement in 3 to 4 dB(A).

STUDY OF THE EFFICIENCY IN TRAFFIC NOISE REDUCTION ON DRAINING PAVEMENTS

KEY WORDS

Noise

Tire / pavement Interaction

Porous Asphalt

Statistical Pass-by Method

Coast-by Method

Dry / Wet

Tire

ÍNDICE DE TEXTO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Objectivos e metodologias	3
1.3	Organização	4
2	PRINCÍPIOS DA ACÚSTICA RODOVIÁRIA	7
2.1	Parâmetros físicos	7
2.2	Frequência	11
2.3	Indicadores de ruído	13
2.4	Geração do ruído rodoviário	16
2.5	Mecanismos de geração mecânica	17
2.6	Mecanismos de geração aerodinâmica	18
2.7	Propagação do ruído rodoviário	20
2.8	Sonómetros e tipos de sonómetros	29
2.9	Métodos de avaliação do ruído	30
2.9.1	Ruído ambiental	31
2.9.2	Ruído pneu/pavimento	33
3	FACTORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO	41
3.1	Veículos	41
3.1.1	Tipo de veículo	42
3.1.2	Tipo de pneu	45
3.1.3	Velocidade do veículo	46
3.2	Características da superfície do pavimento	48
3.2.1	Propriedades físicas da camada	48
3.2.2	Idade das camadas superficiais	51
3.2.3	Rigidez	54
3.3	Condições climatéricas	56
3.3.1	Temperatura e vento	56
3.3.2	Água	60
3.4	Comportamento dos condutores	62
3.5	Propriedades não acústicas	63
4	INFLUÊNCIA DOS PAVIMENTOS	65
4.1	Tipos de pavimento	65
4.1.1	Rígidos	66
4.1.2	Flexíveis	67
4.1.3	Silenciosos	69
4.2	Camadas superficiais dos pavimentos flexíveis	71
4.2.1	Camadas densas	71
4.2.2	Camadas drenantes/porosas	74
4.2.3	Pavimentos eufónicos/modulares	78
4.2.4	Camadas elásticas	79
4.2.5	Tratamentos superficiais	82

4.2.6	Classificação das camadas superficiais em função do ruído	85
4.3	Evolução do estado da superfície	86
4.3.1	Degradações	86
4.3.2	Irregularidades.....	87
4.4	Requisitos para a obtenção de uma camada superficial silenciosa	89
5	INFLUÊNCIA DA TEXTURA DOS PAVIMENTOS	91
5.1	Definição da textura	91
5.2	Métodos de caracterização da textura	93
5.2.1	Mancha da areia.....	94
5.2.2	Pêndulo britânico.....	95
5.2.3	Perfilómetros a laser.....	95
5.2.4	Equipamento UM – Texscan	97
5.3	Relação da textura com o nível de ruído.....	98
5.3.1	Profundidade média da textura.....	98
5.3.2	Espectro de frequência da textura.....	99
6	INFLUÊNCIA DOS PNEUS	105
6.1	Considerações gerais	105
6.2	Caracterização dos pneus	107
6.2.1	Tipos de pneu.....	108
6.2.2	Dimensões e índices	110
6.2.3	Piso	111
6.3	Influência da carga do pneu	112
6.4	Influência da pressão de ar no pneu	113
6.5	Influência do diâmetro do pneu	114
6.6	Influência da largura do pneu.....	117
6.7	Influência do desenho da escultura do pneu.....	117
6.8	Influência das propriedades dos materiais do pneu.....	121
6.9	Influência do pneu no espectro de ruído	123
7	ESTUDO DA EFICÁCIA DOS PAVIMENTOS DRENANTES NA REDUÇÃO DO RUÍDO RODOVIÁRIO ..	125
7.1	Considerações gerais	125
7.2	Metodologia de estudo.....	125
7.2.1	Método estatístico de passagem (SPB)	126
7.2.2	Método de ensaio com o motor desligado	131
7.3	Localização do trecho de estudo.....	134
7.4	Caracterização da camada de desgaste	135
7.4.1	Caracterização do betão betuminoso clássico	136
7.4.2	Caracterização do betão betuminoso drenante	137
7.5	Caracterização da textura	139
7.5.1	Mancha de areia e pêndulo britânico.....	141
7.5.2	Perfilómetro a laser Texscan	144
7.6	Caracterização dos veículos de ensaio.....	147
7.6.1	Características dos veículos de acordo com a Norma ISO 11819-1:1997	147
7.6.2	Características dos veículos e pneus para o Decreto-Lei n.º 72-C/2003	148

7.7	Caracterização das velocidades dos veículos de ensaio e número de passagens	149
7.7.1	De acordo a Norma ISO 11819-1:1997	149
7.7.2	De acordo com o Decreto-Lei n.º 72-C/2003.....	151
7.8	Caracterização das condições meteorológicas e temperatura do pavimento.....	151
8	ANÁLISE DOS RESULTADOS	153
8.1	Decreto-Lei n.º 72-C/2003 de 14 de Abril	153
8.1.1	Análise da relação velocidade de circulação e nível sonoro máximo.....	154
8.1.2	Análise do nível de ruído (L _R).....	157
8.1.3	Análise do espectro de ruído.....	157
8.2	Norma ISO 11819-1:1997.....	159
8.2.1	Análise do nível sonoro máximo.....	161
8.2.2	Análise do índice estatístico de passagem	163
8.2.3	Análise do espectro de ruído.....	165
8.3	Considerações Finais	169
9	CONCLUSÕES	171
9.1	Conclusões gerais	171
9.2	Desenvolvimento Futuro	173
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175
	ANEXO I	183
	ANEXO II	187
	ANEXO III	195
	ANEXO IV	201
	ANEXO V	205
	ANEXO VI	209
	ANEXO VII	213
	ANEXO VIII	219

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Parâmetros físicos [Kiely, 1999]	8
Figura 2.2 – Comprimento de onda vs. frequência [Gonçalves, 2005]	8
Figura 2.3 – Ciclo ou onda completa [Costa, 2003]	8
Figura 2.4 – Escala comparativa da pressão sonora e do nível de pressão sonora [Wayson, 1998]	9
Figura 2.5 – Decréscimos do nível de pressão sonora função do decréscimo de volume de tráfego [Raitanen, 2005]	10
Figura 2.6 – Gama auditiva [Gonçalves, 2005]	11
Figura 2.7 – Espectros de frequência em bandas de oitava e 1/3 de oitava [Sandberg and Ejsmont, 2002]	12
Figura 2.8 – Curvas de resposta das malhas A, B, C e D [Silva, 1978]	12
Figura 2.9 – Espectro produzido por um ligeiro (a) e por um pesado (b) [Sandberg and Ejsmont, 2002]	13
Figura 2.10 – Variação no nível de ruído rodoviário e o nível de ruído equivalente, L_{Aeq} , dB [FEHRL, 2006]	14
Figura 2.11 – Fontes do ruído rodoviário: interação pneu/pavimento (à esquerda) e funcionamento do veículo (à direita)	16
Figura 2.12 – Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações radiais, tangenciais e da parede lateral [Sandberg and Ejsmont, 2002]	17
Figura 2.13 – Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações <i>stick-snap</i> e <i>stick-slip</i> [Sandberg and Ejsmont, 2002]	18
Figura 2.14 – Mecanismos aerodinâmicos do ruído pneu/pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002]	19
Figura 2.15 – Mecanismos de ruído [Donovan et al., 1980]	20
Figura 2.16 – Efeito da distância sobre uma fonte de ruído localizada [Hanson, 2005]	21
Figura 2.17 – Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada [Hanson, 2005]	22
Figura 2.18 – Geometria para uma fonte e receptor nas imediações de um plano do solo [FEHRL, 2006]	25
Figura 2.19 – Alturas equivalentes em relação ao solo [Norma XP S31-133, 2001]	26
Figura 2.20 – Possíveis geometrias na fonte [Roo and Noordhoek, 2004]	28
Figura 2.21 – Possíveis modelos geométricos e geográficos [Roo and Noordhoek, 2004]	29
Figura 2.22 – Ponderações em tempo [Gonçalves, 2005]	29
Figura 2.23 – Método estatístico de passagem (SPB) [Hanson et al., 2005]	34
Figura 2.24 – Método da estrada proximidade (CPX) [Chandler et al., 2003]	35
Figura 2.25 – Método da passagem controlada (CPB) vs. estrada proximidade (CPX) [Anfonso-Lédée, 2006]	36
Figura 2.26 – Método Coast-By (CB)	36
Figura 2.27 – Método da absorção sonora [Morgan, 2006]	37
Figura 2.28 – Método TCB (Trailer Coast-By) [Sandberg and Ejsmont, 2002]	38
Figura 2.29 – Método do tambor [Sandberg and Ejsmont, 2002]	39
Figura 3.1 – Ruído do motor, ruído pneu/pavimento e ruído total apresentados para veículos ligeiros e pesados, em função da velocidade [Bendtsen, 2006]	43
Figura 3.2 – Redução do nível de ruído com veículos de categorias diferentes numa transição entre betão de cimento transversalmente ranhurado e betão betuminoso drenante [Descornet, 2005]	44
Figura 3.3 – Influência da percentagem de veículos pesados nos níveis de ruído, para diferentes velocidades [Descornet, 2005]	44
Figura 3.4 – Gamas de níveis de ruído pneu/pavimento para diferentes tipos de pneu e diferentes tipos de superfície [Phillips et al., 2003]	46
Figura 3.5 – Pneu X a diferentes velocidades, apresentando diferenciações no espectro de ruído para frequências baixas e componentes de frequências altas [Wayson, 1998]	47
Figura 3.6 – Influência da velocidade nos níveis de pressão sonora [Haberl et al., 2005]	47
Figura 3.7 – Influência da dimensão máxima dos agregados no ruído de estrada [Bendtsen, 2006]	48

Figura 3.8 – Desempenho acústico ao longo do tempo para veículos ligeiros a uma velocidade de referência de 50 Km/h [FEHRL, 2006].....	52
Figura 3.9 – Desempenho acústico ao longo do tempo com veículos ligeiros a uma velocidade de referência de 110 Km/h [FEHRL, 2006].....	53
Figura 3.10 – Desempenho acústico ao longo do tempo para veículos de peso médio a uma velocidade de referência de 85 Km/h [FEHRL, 2006].....	53
Figura 3.11 – Desempenho acústico ao longo do tempo para veículos pesados a uma velocidade de referência de 85 Km/h [FEHRL, 2006].....	54
Figura 3.12 – Relação entre a intensidade do som medida pelo método CPX e o ângulo de fase médio medido no ensaio de módulo dinâmico [Biligiri, 2006].....	55
Figura 3.13 – Refracção da onda sonora devido ao gradiente da temperatura [Watts, 2005]	56
Figura 3.14 – Refracção da onda sonora devido ao radiante do vento [Watts, 2005].....	57
Figura 3.15 – Relação entre a temperatura da estrada e a temperatura do ar (a) e entre a temperatura da estrada e a temperatura do pneu (b) [Sandberg and Ejsmont, 2002].....	57
Figura 3.16 – Curva ruído-temperatura [Sandberg and Ejsmont, 2002].....	59
Figura 3.17 – Níveis de pressão sonora versus temperatura do ar para 6 tipos de pneus, a 53 Km/h (a) e 80 Km/h (b) [Sandberg and Ejsmont, 2002].....	59
Figura 3.18 – Espectro de frequência típico de uma superfície húmida versus espectro em condições secas, sobre a mesma superfície [Sandberg and Ejsmont, 2002]	61
Figura 3.19 – Níveis de ruído em condições seco (a) e molhado (b) [Jiménez, 2006].....	62
Figura 3.20 – Influência dos diferentes parâmetros no nível de ruído [Mancosu, 1999]	63
Figura 4.1 – Pavimento rígido: constituição e modo de funcionamento [Pereira e Picado-Santos, 2002]	66
Figura 4.2 – Pavimento flexível: constituição e modo de funcionamento [Pereira e Picado-Santos, 2002]	67
Figura 4.3 – Conceito de pavimento perpétuo	68
Figura 4.4 – Diversos tipos de pavimentos silenciosos.....	71
Figura 4.5 – Valor máximo, mínimo e médio para cada tipo de pavimento e para veículos a 50 Km/h [Andersen et al., 2006].....	73
Figura 4.6 – Valor máximo, mínimo e médio para cada tipo de pavimento e para veículos a 80 Km/h [Andersen et al., 2006].....	74
Figura 4.7 – Valor máximo, mínimo e médio para cada tipo de pavimento e para veículos a 110 Km/h [Andersen et al., 2006].....	74
Figura 4.8 – Efeito de projecção de água numa camada betuminosa clássica vs. numa camada drenante [Bartolomaeus, 2006].....	75
Figura 4.9 – Configuração de uma camada de desgaste drenante constituída por duas camadas porosas [Bendtsen and Andersen, 2005]	76
Figura 4.10 – Níveis sonoros em camadas porosas para diferentes tamanhos de agregado [Rymer and Donovan, 2005]	77
Figura 4.11 – Níveis sonoros em duplas camadas porosas para diferentes tamanhos de agregado [Rymer and Donovan, 2005]	77
Figura 4.12 – Performance de uma camada de desgaste drenante tradicional (SLPA) e de uma camada drenante dupla (TLPA) [Hofman, 2006]	78
Figura 4.13 – Exemplos de superfícies de estrada modulares testadas durante o projecto holandês “Estradas para o Futuro” [FEHRL, 2006]	79
Figura 4.14 – Níveis de potência sonora em camadas densas, drenantes e de borracha [Fujiwara et al, 2005]... 80	80
Figura 4.15 – Superfícies de estrada poro-elásticas em Estocolmo, Suécia [Sandberg e Kalman, 2005].	82
Figura 4.16 – Resultados das medições CPX (esquerda) e CPB (direita) nas secções de teste, a uma velocidade de teste de 50 Km/h [Sandberg e Kalman, 2005].	82
Figura 4.17 – Níveis de ruído obtidos pelo método de Close Proximity em diferentes tratamentos superficiais [Sandberg and Ejsmont, 2002]	84
Figura 4.18 – Tabela de comparação das propriedades acústicas para o caso de superfícies Holandesas e Alemãs [Bartolomaeus, 2006].....	86

Figura 4.19 – Tipos de irregularidades e a sua influência em diferentes funções da superfície [Chavet et al., 1987]	87
Figura 4.20 – Espectro de ruído versus espectro da textura [Descornet and Sandberg, 1980]	88
Figura 5.1 – Detalhes dos comprimentos e profundidades de textura [DMRB-HD 36/99, 1999]	92
Figura 5.2 – Definição das irregularidades em função da amplitude e do comprimento de onda [Pereira et al, 2006]	92
Figura 5.3 – Efeitos sobre a deformação dos pneus [Wayson, 1998]	93
Figura 5.4 – Ensaio da Mancha de Areia	94
Figura 5.5 – Ensaio do Pêndulo Britânico	95
Figura 5.6 – Perfilómetro a laser ROSANvm [Koklanaris, 1998]	96
Figura 5.7 – CTMeter [Prowell and Hanson, 2005]	96
Figura 5.8 – Esquema do perfilómetro 3D Texscan (U.M.)	98
Figura 5.9 – Detalhes de superfícies com texturas positiva (a) e negativa (b) [DMRB-HD 36/99, 1999]	98
Figura 5.10 – Nível de textura em bandas de 1/3 de oitava para todos os pavimentos em estudo [Domenichini et al., 1999]	100
Figura 5.11 – Definição do tipo de textura em função do comprimento de onda e da frequência espacial [Domenichi et al., 1999]	101
Figura 5.12 – Variação no nível de ruído (SPB) com a amplitude da textura na gama da mega-textura para veículos ligeiros, a uma velocidade de 90 Km/h a 7.5 m [FEHRL, 2006]	103
Figura 6.1 – Novos conceitos de pneu (1988/1989) [Sandberg and Ejsmont, 2002]	106
Figura 6.2 – Novos conceitos de pneu (1999 a 2001) [Sandberg and Ejsmont, 2002]	106
Figura 6.3 – Constituição de um pneu [www.michelintransport.com]	107
Figura 6.4 – Pneu diagonal [www.braziltires.com]	108
Figura 6.5 – Pneu Radial [www.braziltires.com]	108
Figura 6.6 – Comportamento em curva de um pneu diagonal e de um pneu radial [www.braziltires.com]	109
Figura 6.7 – Área de contacto com o pavimento (com e sem carga) de um pneu diagonal e de um pneu radial [www.braziltires.com]	109
Figura 6.8 – Caracterização do tamanho do pneu [Decreto-Lei n.º 72-C, 2003]	110
Figura 6.9 – Índices de um pneu [Catálogo Michelin, 2006]	111
Figura 6.10 – Composição do piso de um pneu [www.braziltires.com.br]	111
Figura 6.11 – Nível de ruído em passagem em condições de carga vs sem carga [Pucher et al., 2006]	112
Figura 6.12 – Influência da pressão do ar, no pneu, na drenagem da água [www.michelintransport.com]	114
Figura 6.13 – Ruído de um veículo sem carga com uma pressão de ar aumentada e diminuída vs. nível standard e para um veículo com carga [Pucher et al., 2006]	114
Figura 6.14 – Ângulo de ataque [Sandberg e Ejsmont, 2002]	115
Figura 6.15 – Correlação entre o diâmetro da jante e o nível de ruído sobre uma superfície ISO [Roovers, 2002]	116
Figura 6.16 – Influência do diâmetro do pneu [Pucher et al., 2006]	116
Figura 6.17 – Influência da largura de um pneu nos níveis de ruído, em diferentes pavimentos [Phillips et al., 2003]	117
Figura 6.18 – Desenho geral do piso de um pneu [Sandberg and Ejsmont, 2002]	118
Figura 6.19 – Influência das ranhuras transversais e circunferenciais no espectro do ruído [Sandberg and Ejsmont, 2002]	121
Figura 6.20 – Efeito das propriedades da base de construção dos pneus sobre o ruído em passagem para várias superfícies [Pucher et al., 2006]	122
Figura 6.21 – Comparação de um pneu com construção de base otimizada [Pucher et al., 2006]	122
Figura 6.22 – Separação do espectro do ruído do pneu devido às vibrações do pneu (esquerda) e efeitos da escultura do pneu (direita). (X: todas as Estações; S: Verão; W: Inverno; P: Pneu de Referência em Branco da PIARC) [Descornet, 2005]	123

Figura 6.23 – Espectro de frequência em diferentes tipos de pavimentos, para um pneu “Goodyear Aquared” circulando a 72 Km/h [McDaniel and Thornton, 2004].....	124
Figura 7.1 – Definição da zona onde não é permitida a existência de quaisquer barreiras de segurança [Norma ISO 11819-1:1997].....	127
Figura 7.2 – Exigências relativamente à área que o tipo de superfície deverá abranger [Norma ISO 11819-1:1997].....	127
Figura 7.3 – Configurações de estrada típicas e posições do microfone [Norma ISO 11819-1:1997]	129
Figura 7.4 – Requisitos mínimos para o terreno de ensaio (a parte sombreada é a área de ensaio) [Decreto-Lei n.º 72-C/2003].....	131
Figura 7.5 – Posição dos microfones e dos veículos para a realização dos ensaios [Decreto-Lei n.º 72-C/2003].....	133
Figura 7.6 – Localização dos trechos de ensaio	135
Figura 7.7 – Curva granulométrica da camada em betão betuminoso.....	137
Figura 7.8 – Curva granulométrica da camada em betão betuminoso drenante.....	138
Figura 7.9 – Ensaio da mancha de areia	140
Figura 7.10 – Ensaio do pêndulo britânico.....	140
Figura 7.11 – Aspecto da superfície em betão betuminoso	142
Figura 7.12 – Aspecto da superfície em betão betuminoso drenante.....	142
Figura 7.13 (a) – Aspecto da superfície: provete A - betão betuminoso drenante	144
Figura 7.13 (b) – Aspecto da superfície: Provete F - betão betuminoso clássico.....	145
Figura 7.14 – Distribuição do número de pontos e nível de textura dos provetes A e F	147
Figura 7.15 – Veículos de ensaio (condições seco e molhado).....	148
Figura 7.16 – Veículo Volvo S40 e pneu Michelin Primacy 205/55 R16 91V	149
Figura 7.17 – Veículo Citroën Xsara Picasso e piso do pneu Michelin Energy 185/65 R15 88H.....	149
Figura 8.1 – Esquema de localização das medições	153
Figura 8.2 – Níveis de pressão sonora máximos no pavimento clássico, para os pneus em estudo.....	155
Figura 8.3 – Níveis de pressão sonora máximos no pavimento drenante, para os pneus em estudo	155
Figura 8.4 – Níveis de pressão sonora para os pavimentos e pneus em estudo para a velocidade de referência.....	157
Figura 8.5 – Espectro de frequência para o pneu C1_205, nos pavimentos em estudo	158
Figura 8.6 – Espectro de frequência para o pneu C1_205, nos pavimentos em estudo	158
Figura 8.7 – Esquema de localização das medições e microfone.....	160
Figura 8.8 – Níveis de ruído para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição seco.....	161
Figura 8.9 – Níveis de ruído para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição molhado.....	162
Figura 8.10 – Níveis de ruído para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição seco.....	162
Figura 8.11 – Níveis de ruído para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição molhado.....	162
Figura 8.12 – Espectro médio de frequências para ligeiros em velocidades médias, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado.....	166
Figura 8.13 – Espectro médio de frequências para ligeiros em velocidades altas, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado	167
Figura 8.14 – Espectro médio de frequências para pesados a velocidades médias, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado.....	168
Figura 8.15 – Espectro médio de frequências para ligeiros e pesados a velocidades médias, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado.....	169

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Relações de frequência entre notas de uma oitava [Costa, 2003].....	12
Quadro 2.2 – Coeficiente de absorção atmosférica (em dB/Km) por banda de oitava [Norma XP S31-133, 2001]	24
Quadro 2.3 – Coeficiente de absorção do solo (G) [Norma XP S31-133, 2001].....	25
Quadro 2.4 – Limites de exposição em função da classificação da zona [Decreto-Lei n.º 9/2007]	33
Quadro 3.1 – Reduções de ruído (L_{Amax} , método SPB) em relação à redução da velocidade [Sandberg and Ejsmont, 2002]	48
Quadro 3.2 – Coeficientes de correcção da temperatura para diferentes tipos de camadas superficiais [Sandberg and Ejsmont, 2002]	58
Quadro 3.3 – Estimativa do efeito da humidade na superfície de estrada sobre os níveis sonoros [Sandberg and Ejsmont, 2002]	61
Quadro 4.1 – Emissão do ruído para diferentes tipos de camadas e para veículos a 50, 80 e 110Km/h [Andersen et al., 2006]	72
Quadro 4.2 – Factores de correcção em dB(A) relativos a uma superfície em betão betuminoso 0/11 para a velocidade de 50 Km/h [Descornet et al., 2006].....	85
Quadro 6.1 – Principais invenções e experiências relativas à evolução dos pneus	105
Quadro 6.2 – Influência da pressão e carga do pneu no ruído numa Superfície ISO, obtido pelo método Coast-By dB(A) [Pucher et al., 2006]	113
Quadro 6.3 – Diferentes disposições de segmentos de pneu e principais distribuições aleatórias [Sandberg and Ejsmont, 2002]	119
Quadro 6.4 – Influência de elementos de perfil simples no ruído pneu/pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002]	120
Quadro 6.5 – Parâmetros para avaliação das propriedades dos materiais dos pneus na produção de ruído [Pucher et al., 2006]	121
Quadro 7.1 – Velocidades de referência (V_{ref}) e factores preponderantes (W_x) [Norma ISO 11819-1:1997].....	130
Quadro 7.2 – Fuso granulométrico para camadas em betão betuminoso	136
Quadro 7.3 – Fuso granulométrico para camadas em betão betuminoso drenante	138
Quadro 7.4 – Resultados do ensaio da mancha de areia e pêndulo britânico na camada em betão betuminoso clássico.....	141
Quadro 7.5 – Resultados do ensaio da mancha de areia e pêndulo britânico na camada em betão betuminoso drenante	143
Quadro 7.6 – Profundidade média da textura obtida através do Texscan	145
Quadro 7.7 – Número de passagens válidas para cada categoria de velocidade	150
Quadro 7.8 – Número de passagens para a categoria de pneu	151
Quadro 7.9 – Valores observados para a temperatura do ar, velocidade do vento e temperatura do pavimento	152
Quadro 8.1 – Níveis de pressão sonora máximos para cada tipo de pavimento, pneu e velocidade de circulação	154
Quadro 8.2 – Análise de regressão e níveis de ruído pneu/pavimento à velocidade de referência.....	156
Quadro 8.3 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição seco	164
Quadro 8.4 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição seco	164

Quadro 8.5 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição molhado.....	164
Quadro 8.6 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição molhado.....	165
Quadro 8.7 – Índice estatístico de passagem (SPBI).....	165

GLOSSÁRIO DE SÍMBOLOS E DE ABREVIATURAS

A	- Amplitude
A	- Largura da jante
(A)	- Malha A
A_{atm}	- Atenuação atmosférica
$A_{barreira}$	- Atenuação devido à presença de uma barreira entre a fonte emissora e o receptor
A_{div}	- Atenuação devido à divergência geométrica da fonte
$A_{excesso}$	- Atenuação do efeito do solo
ANSI	- American National Standards Institute
B	- Largura da secção do pneu
(B)	- Malha B
BAC	- Betão armado continuo
BBR	- Betão betuminoso rugoso convencional
BCC	- Brushed Cement Concrete
c	- Velocidade do som
(C)	- Malha C
CEN	- Comité Europeu da Normalização
CETUR	- Centro de Documentação
CPB	- Método da passagem controlada
CPX	- Método da estrita proximidade
d	- Distância directa entre o emissor e o receptor
(D)	- Malha D
dB	- Decibéis
DDAP	- Camada drenante dupla
DENAP	- Camada densa
DPAC	- Doble Porous Asphalt Concret
DR	- Método do tambor
EACC	- Exposed Aggregate Concrete
EEUU	- Estados Unidos
EN	- Norma Europeia
f	- Frequência
F	- Fast – Rápida
G	- Coeficiente de absorção do solo
GO	- Divisão das irregularidades em grandes ondas
h	- Hora
H	- Profundidade média da textura superficial
H	- Altura da secção do pneu
HMA	- Hot mix asphalt
h_r	- Altura real do receptor

HRA	- Hot Rolled Asphalt
h_s	- Altura real do emissor
Hz	- Hertz
I	- Impulse – Impulso
IEC /CEI	- Comissão Electrotécnica Internacional
IPG	- Independent Publisher Group
IRI	- International Roughness Index
ISO	- International Organization for Standardization
KHz	- Quilo Hertz
Km	- Quilometro
L_A	- Nível sonoro a uma distância r
L_{Aeq}	- Nível sonoro contínuo equivalente ponderado A
L_{day}	- Nível de som de ponderação A equivalente, para o período entre as 7:00 e as 19:00
L_{den}	- Indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno
L_{eq}	- Nível sonoro contínuo equivalente
$L_{evening}$	- Nível de som de ponderação A equivalente, para o período entre as 19:00 e as 23:00
$L_{(i)}$	- Nível de pressão sonora das fontes individuais
$L_{máx}$	- Nível de ruído máximo
L_{night}	- Nível de som de ponderação A equivalente, para o período entre as 23:00 e as 7:00
L_p	- Nível de pressão sonora
L_{ref}	- Nível sonoro de referência
L_{total}	- Nível de pressão sonora total
L_{veh}	- Nível sonoro de cada categoria de veiculo
L_w	- Nível da potência sonora
L_{xx}	- Nível de pressão sonora excedido em x%
L1, L2	- Níveis de ruído do veículo
m	- Metro
MO	- Divisão das irregularidades em médias ondas
MPD	- Média das médias da profundidade de perfis
M40	- Motorway 40
NF	- Norma Francesa
p	- Pressão sonora instantânea
p_o	- Pressão sonora de referência
Pa	- Pascal
PAC	- Single Pours Asphalt Concret ou Betão betuminoso poroso
PERS	- Camadas poro-elásticas
PFC	- Porous friction course
PIARC	- Comissão técnica para as características das superfícies da Associação Internacional permanente de congressos rodoviários, da Associação Mundial de Estradas

PO	-	Divisão das irregularidades em pequenas ondas
r	-	Raio médio do círculo de areia
r	-	Distância entre fonte do ruído e o receptor
r _{ref}	-	Distância de referência
s	-	Segundo
S	-	Slow – Lenta
SDAP	-	Camada drenante simples
SETRA	-	Service d'études techniques des routes et autoroutes
SILVIA	-	SilendaVia (Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control)
SLP	-	Nível de pressão sonora
SMA	-	Stone mastic asphalt
SPB	-	Método estatístico de passagem
Stick-Slip	-	Adere/Desliza
Stick-Snap	-	Adere/Descola
t	-	Período
T	-	Período de tempo durante o qual se calcula L _{A eq}
TCB	-	Método de reboque Cost-By
TRL	-	Transport Research Laboratory
TRRL	-	Transport and road research laboratory
TSF	-	Thin Layers
TUW	-	Universidade Tecnológica de Viena
UE	-	União Europeia
UM		Universidade do Minho
V	-	Volume de areia utilizada
V _{ref}	-	Velocidade de referência
VTI	-	Instituto sueco para a pesquisa em estradas e transportes nacionais
V1, V2	-	Velocidades de referência de categorias individuais de veículos
W	-	Watts
W	-	Potência sonora da fonte de ruído
WG8	-	Grupo de trabalho 8 da comissão europeia
W1, W2	-	Factores preponderantes, equivalente às proporções assumidas de categorias de veículos no tráfego
z _s	-	Altura equivalente do emissor
z _r	-	Altura equivalente do receptor
α	-	Coeficiente de atenuação atmosférica à frequência central exacta para cada banda de oitava
λ	-	Comprimento de onda
μPa	-	Micro-pascals

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O espírito de prevenção do ruído inerente à circulação dos meios de transporte prevalece desde a época do Império Romano. Outrora, na Idade Média e em algumas cidades europeias, foi proibida a circulação de carruagens à noite, de forma a assegurar o descanso dos seus habitantes. No entanto, os problemas de ruído verificados no passado não se podem comparar com os da sociedade moderna.

Deste modo, surgiu o pavimento em betão betuminoso drenante, comumente designado na Europa por “pavimento silencioso”, capaz de reduzir os riscos de aquaplanagem, eliminar o fenómeno de espelhamento e aumentar a aderência entre o pneu e o pavimento, sem causar danos no primeiro e reduzindo os ruídos provenientes desse contacto. As primeiras misturas betuminosas porosas com características drenantes foram desenvolvidas a partir de experiências realizadas nos Estados Unidos, tendo-se posteriormente transferido este conceito para a Europa.

Os pavimentos drenantes, devido à sua composição, apresentam depois de compactadas uma porosidade elevada, acima dos 20%, estabelecendo-se no seu interior vazios comunicantes que permitem assegurar um bom nível de resistência à derrapagem sob condições de tempo húmido ou seco e uma rápida drenagem que, associada à optimização das inclinações transversais das vias, contribui para a remoção da água à superfície, reduzindo assim os efeitos de projecção de água (“splash” e “spray”) e melhorando a visibilidade durante condições de pluviosidade intensa.

Os pavimentos de textura fina e os pavimentos de borracha também se podem incluir no grupo dos pavimentos silenciosos. Para caracterizar o nível sonoro resultante da passagem do tráfego em diferentes superfícies e para determinar as propriedades acústicas das camadas superficiais existem vários métodos. Estes métodos constam nas Normas ISO, Normas Francesas e Decreto-Lei, tais como, o método estatístico de passagem (ISO 11819-1: 1997), o método da estrada proximidade (ISO/DIS 11819-2: 2000), o método da passagem controlada (NF S31-119-2: 2000), o método coast-by ou motor desligado (ISO 13325:2003 ou Decreto-Lei n.º 72-C/2003), o método da superfície estendida (ISO 13472-1:2002).

Os métodos de ensaio que permitem resultados mais exactos são o método da estrada proximidade (CPX) e o método estatístico de passagem (SPB). No primeiro obtém-se melhores resultados no que respeita à quantificação dos componentes do ruído pneu/pavimento no âmbito do ruído rodoviário e o ensaio do tipo “passagem” (SPB) é considerado o melhor na quantificação do ruído total na berma da estrada ou imediações, sendo que tem em conta todos os tipos de fonte de ruído rodoviário, em vez de apenas os componentes pneu/pavimento [Swanlund, 2005].

Para além do tipo de camada superficial, existem outros factores associados à emissão do ruído, tais como as características dos veículos e o comportamento de condução. Dentro das características dos veículos, pode-se ainda referir o tipo de veículo (peso, dimensões, número de eixos, potência do motor), a velocidade de circulação e o tipo de pneu.

A circulação automóvel é um parâmetro que influencia consideravelmente os níveis sonoros. No entanto, as condições atmosféricas são um factor que também tem uma grande influência. Os seus efeitos determinam, não só o modo de propagação das ondas sonoras, como também a própria emissão dessas ondas, na medida em que a temperatura e a humidade do pavimento actuam no ruído resultante da interacção pneu/pavimento e a velocidade do vento condiciona o ruído aerodinâmico dos veículos.

Nas últimas décadas, os limites legislativos apresentados pelas directivas ambientais, relativos à emissão sonora dos veículos rodoviários têm sofrido alterações, tornando-se cada vez mais exigentes, pelo que, a prevenção do ruído e o controlo da poluição sonora tomaram nova aceção. A previsão e controlo da poluição sonora, em Portugal, efectuavam-se através da aplicação do Decreto-Lei n.º 292/2000. No entanto, com a publicação da Directiva n.º 2002/49/CE, transposta pelo Decreto-Lei n.º 146/2006, passou a ser necessário actualizar, articular e conferir coerência entre estas normas e/ou regimes jurídicos. Assim, recentemente, foi publicado em Portugal o Decreto-Lei n.º 9/2007 com esse objectivo.

Calcula-se que uma elevada percentagem (aproximadamente 86%) do ruído ambiente provém dos aviões, comboios e em particular dos automóveis, ficando o remanescente (14%) atribuído à indústria, cafés, bares, locais públicos, entre outros. Nestas circunstâncias, torna-se cada vez mais imperativo conhecer a eficácia das diferentes superfícies rodoviárias na redução dos níveis sonoros, resultantes da circulação automóvel.

Diversos estudos têm sido realizados, em vários países, para caracterizar os níveis sonoros em diferentes tipos de pavimento, tendo-se concluído que os pavimentos em betão betuminoso são, em geral, mais silenciosos que os pavimentos em betão armado [Wayson, 1998].

Portugal tem vindo a desenvolver estudos para caracterizar os níveis sonoros em diferentes tipos de pavimentos, tais como o pavimento em betão armado, o pavimento rugoso e o pavimento betuminoso modificado com borracha [Certiprojecto, 2004 e Probigalp, 2006].

Porém, não existe ainda para a realidade portuguesa uma ampla experiência na avaliação da eficácia da redução dos níveis sonoros em pavimentos betuminosos drenantes e betuminosos clássicos, especialmente sob a influência do parâmetro condições atmosféricas, o qual actua directamente na fonte emissora. Assim, com este estudo pretende-se contribuir para o enriquecimento do conhecimento nesta área.

1.2 Objectivos e metodologias

Este estudo tem como objectivo verificar a eficácia na redução dos níveis sonoros – resultantes da circulação automóvel – de um pavimento em betão betuminoso drenante (BD), por oposição a um pavimento em betão betuminoso “clássico” (BC), para as condições seco e molhado.

Para este efeito, foram seleccionados e caracterizados dois trechos experimentais, um em pavimento betão betuminoso drenante (BD) e outro em pavimento betão betuminoso “clássico” (BC), num Sublanço da Concessão Scut do Grande Porto Consequentemente, de modo aferir os níveis sonoros para os dois tipos de camada de desgaste em estudo, nas condições seco e molhado, foram efectuadas medições “in situ” recorrendo-se ao método estatístico de passagem.

O método estatístico de passagem preconiza a medição do nível sonoro máximo para um determinado número de passagens e para três categorias de veículos (ligeiros, pesados de dois eixos e pesados de três eixos) a determinadas velocidades, assim como, estabelece condições para a selecção do local. Deste modo, tendo em conta o definido na Norma ISO 11819-1: 1997, os trechos seleccionados foram construídos consecutivamente.

Atendendo ao facto de os ensaios serem efectuados numa fase prévia à abertura ao tráfego do Sublanço, fez-se uma selecção preliminar dos veículos de ensaio procurando representar uma amostra significativa das categorias preconizadas na Norma ISO 11819-1: 1997 e que circulam numa estrada ou auto-estrada. Assim, foram seleccionados quatro veículos ligeiros, um veículo pesado de dois eixos e um veículo pesado de três eixos.

Embora esta Norma estabeleça três categorias de estrada com velocidades de referência definidas de acordo com a escala de velocidades a que o tráfego circula, pretendeu-se neste estudo representar aproximadamente as condições reais de circulação rodoviária nas auto-estradas portuguesas. Desta forma, foram consideradas as categorias de velocidades “média” para veículos ligeiros e pesados e “elevada” para veículos ligeiros, combinada com a velocidade “média” dos veículos pesados, e as seguintes configurações de ensaio – betão betuminoso clássico e betão betuminoso drenante, ambas para as condições “seco” e “molhado”.

Em paralelo, e atendendo à importância que reveste o ruído inerente à interacção pneu/pavimento, foram efectuadas medições, nos pavimentos em estudo, aplicando também o método do motor desligado, visto que este se baseia nos princípios estabelecidos no método de passagem, diferindo apenas pelo facto da passagem do veículo de ensaio junto ao ponto de medição ocorrer com o motor desligado e em ponto morto. Estes ensaios só foram realizados na condição seco.

Para a realização deste ensaio foram seleccionadas duas viaturas ligeiras, equipadas com quatro pneus idênticos da classe C1 (um Volvo S40 2.0D equipado com quatro pneus

Michelin Primacy 205/55 R16 91V e um Citroën Xsara Picasso, equipado com quatro pneus Michelin Energy 185/65 R15 88H).

Foram efectuadas dezasseis medições para cada um dos veículos e camadas em estudo, a velocidades inferiores e superiores à velocidade de referência, tendo sido utilizados dois sonómetros, de forma a permitir medições em simultâneo para cada passagem de veículo.

Para além da velocidade, foram ainda caracterizadas a temperatura do ar, a velocidade do vento e a temperatura do pavimento.

A análise dos resultados será abordada de três formas distintas, sendo que para o método estatístico de passagem pretende-se relacionar a velocidade da circulação com o nível sonoro máximo obtido para cada tipo de pavimento na condição “seco” e “molhado”, determinar o índice estatístico de passagem e comparar os diversos espectros médios de frequência obtidos. No caso do método com o motor desligado pretende-se, primeiro, avaliar a relação entre a velocidade de circulação e o nível sonoro máximo. Em segundo, pretende-se comparar os diversos níveis de pressão sonora obtidos em cada pavimento e cada tipo de pneu e, em terceiro lugar, comparar os espectros médios de frequência obtidos em cada pavimento e para cada tipo de pneu.

1.3 Organização

O trabalho desenvolvido é apresentado em nove capítulos. Neste primeiro capítulo, enquadra-se o tema, apresenta-se o objectivo e a metodologia utilizada e faz-se uma descrição da organização do trabalho.

No segundo capítulo, apresentam-se os princípios da acústica rodoviária, seguindo-se uma abordagem da caracterização do ruído ambiental e dos métodos de avaliação do ruído pneu/pavimento.

No terceiro capítulo, referem-se os principais factores que afectam de modo preponderante o ruído do tráfego rodoviário, destacando-se os relativos aos veículos, às camadas superficiais e às condições climatéricas. Tecem-se ainda algumas considerações quanto à relação do ruído com as propriedades não acústicas das superfícies, tais como o atrito e a durabilidade.

No quarto capítulo, são abordados os diferentes tipos de pavimento, enfatizando-se os mais utilizados em Portugal e as diferentes camadas superficiais que compõem os pavimentos flexíveis silenciosos e o modo como estas influenciam os níveis de ruído. Também são apresentados diversos estudos elaborados por diferentes países e grupos de trabalho, com o objectivo de se estabelecer comparações ao nível de diversos tipos de camadas superficiais.

No quinto capítulo, são apresentadas as definições que constam da Associação Internacional Permanente de Congressos Rodoviários (PIARC) para os diferentes tipos de textura e alguns métodos para a sua caracterização. Neste capítulo, também se esclarece a relação entre a textura do pavimento e os níveis de ruído.

O sexto capítulo inicia com a descrição detalhada das características dos pneus, tipo, dimensões, índice e escultura do piso. A seguir, expõe-se a influência que a carga, pressão, diâmetro, largura e desenho da escultura do pneu exercem sobre os níveis sonoros.

No sétimo capítulo, descrevem-se detalhadamente os métodos aplicados para avaliar o ruído pneu/pavimento, assim como os ensaios de caracterização dos pavimentos em betão betuminoso clássico e em betão betuminoso drenante, nomeadamente a porosidade, curva granulométrica, textura, permeabilidade, atrito e irregularidade. Apresenta-se também a caracterização dos veículos de ensaio e dos pneus em estudo.

No oitavo capítulo apresenta-se a metodologia dos ensaios, descrevem-se e interpretam-se os resultados obtidos e por último, no capítulo nono, apresenta-se as conclusões deste trabalho, sugerindo-se possíveis caminhos para futuras abordagens no âmbito da investigação.

O anexo I apresenta os principais conceitos descritos no Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro.

No anexo II apresenta-se a imagem obtida através do equipamento Texscan e a fotografia correspondente de todos os provetes extraídos dos trechos em betão betuminoso drenante e em betão betuminoso clássico.

No anexo III apresenta-se o número de pontos da amostra em função da frequência e no anexo IV o nível de textura em função da frequência, de cada provete.

No anexo V apresenta-se os níveis sonoros obtidos em cada banda de 1/3 de oitava, aplicando o Decreto-Lei n.º 72-C/2003, nos pavimentos em estudo (betão betuminoso clássico e betão betuminoso drenante) e para os pneus Michelin Primacy 205/55 R16 91V e pneus Michelin Energy 185/65 R15 88H, para as velocidades de ensaio e na condição seco.

No anexo VI representa-se o andamento do espectro de frequência relativo aos dados do Anexo V.

No anexo VII são apresentadas as figuras dos níveis sonoros obtidos para cada gama de velocidades de circulação, média e alta, e para cada categoria de veículo, nos pavimentos em estudo, nas condições seco e molhado.

No anexo VIII apresentam-se os espectros obtidos para os dados do Anexo VII.

2 PRINCÍPIOS DA ACÚSTICA RODOVIÁRIA

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 é, por sua vez, um som indesejado ou que não apresenta interesse pelo receptor. Após períodos longos de exposição, o ruído causa incomodidade nos receptores, produzindo nestes reacções adversas.

Deste modo, 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.

Assim, neste capítulo apresentam-se os principais parâmetros físicos relativos à percepção e caracterização do som, as escalas actualmente usadas e os principais indicadores de incomodidade, nomeadamente os recentemente preconizados pela Comunidade Europeia.

Apresentam-se ainda os principais mecanismos de geração e de propagação do ruído rodoviário. Destes mecanismos destacam-se os relativos ao contacto entre pneu e pavimento, dada a sua predominância a velocidades superiores a 50 km/h [Sanz, 2006].

Finalmente, faz-se uma breve apresentação dos equipamentos e métodos mais utilizados na medição do ruído ambiental e do tráfego rodoviário.

2.1 Parâmetros físicos

Um corpo em vibração ou fonte sonora, ao emitir uma certa energia, vai provocar a alteração dos valores das variáveis de estado (pressão, temperatura e massa específica) no meio que o confina, alteração esta que vai propagar-se através das ondas elásticas. A pressão sonora é uma grandeza definida pela variação, relativamente ao valor de equilíbrio, da pressão provocada pela propagação de ondas sonoras [Silva, 1978].

As ondas sonoras produzidas pelos corpos em vibração podem ser completamente caracterizadas a partir de 3 parâmetros: a amplitude, o comprimento de onda e o período (Figura 2.1).

A amplitude (A) corresponde à pressão máxima ou mínima produzida pela vibração, o comprimento de onda (λ) corresponde à distância entre cristas ou senos sucessivos e o período (t) corresponde ao tempo entre esses picos. A unidade utilizada para a medida da

amplitude depende do tipo da onda. Por exemplo, a amplitude de ondas de som e sinais de áudio costumam ser expressas em decibéis (dB).

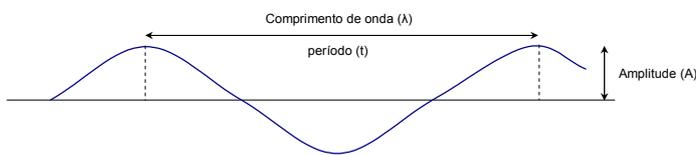


Figura 2.1 – Parâmetros físicos [Kiely, 1999]

O comprimento de onda é definido pelo inverso da frequência de um som e é dado pela Equação 2.1 [Costa, 2003]:

Equação 2.1:

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

em que:

- λ é o comprimento de onda (m/ciclos);
- c é a velocidade do som (344 m/s);
- f é a frequência (Hz ou ciclos/s).

Assim, a pequenos comprimentos de onda correspondem altas frequências e vice-versa (Figura 2.2).

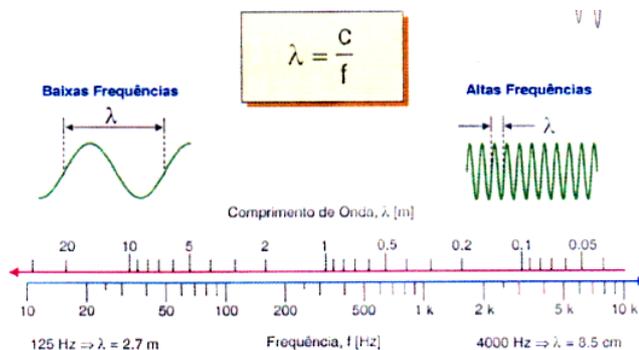


Figura 2.2 – Comprimento de onda vs. frequência [Gonçalves, 2005]

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, designando-se por ciclo ou onda completa a totalidade das variações de pressão que, iniciando no zero, apresentam todos os valores positivos e negativos possíveis crescentes e decrescentes, terminando novamente no zero (Figura 2.3).



Figura 2.3 – Ciclo ou onda completa [Costa, 2003]

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. Estas pequenas flutuações de pressão em torno da pressão barométrica viajam como ondas no ar e flexionam o tambor do ouvido, criando a sensação de som. As vibrações dos veículos criam flutuações de pressão facilmente detectáveis pelo ouvido humano. O ouvido saudável pode detectar flutuações de pressão tão baixas quanto 2×10^{-5} Pa (o ponto inicial / origem do acto de ouvir) e flutuações maiores até que a dor física começa (considera-se que o ponto inicial da dor está aproximadamente a 63 Pa). Esta larga escala de valores é difícil de manipular. Além disso, a resposta da audição humana não é linear.

Uma unidade derivada internacional, usada para descrever as flutuações da pressão sonora é o decibel. O decibel é, por natureza logarítmico, geralmente abreviado pela nomenclatura dB e indica o nível de pressão sonora (L_p). O nível de pressão sonora é calculado pela Equação 2.2 [Wayson, 1998]:

Equação 2.2:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{p^2}{p_o^2} \right)$$

em que:

- L_p representa o nível de pressão sonora (dB);
- p a pressão sonora instantânea (Pa);
- p_o a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa = $20 \mu\text{Pa}$).

O uso do logaritmo não só reduz a larga escala de valores que devem ser tratados, como também corresponde mais aproximadamente à forma como os ouvidos humanos apercebem ou captam o som. A escala derivada transforma-se agora em 0 dB (ponto inicial do acto de ouvir) até aproximadamente 130 dB (ponto inicial da dor). A diferença entre nível de pressão sonora (SPL) e pressão sonora é muito significativa, como se mostra na Figura 2.4 a partir de uma escala comparativa das duas grandezas [Wayson, 1998].

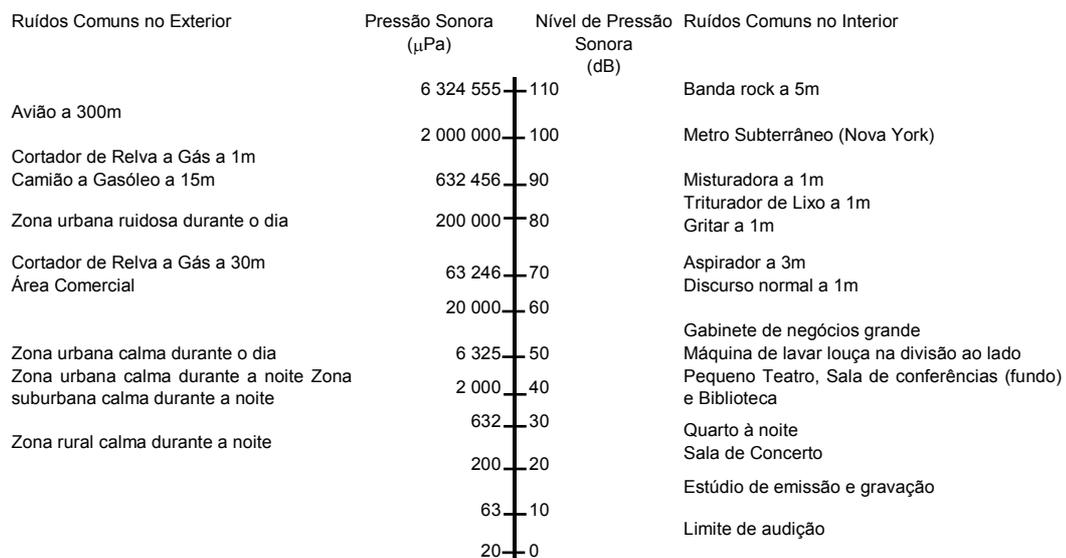


Figura 2.4 – Escala comparativa da pressão sonora e do nível de pressão sonora [Wayson, 1998]

Os decibéis não se adicionam linearmente, mas de forma logarítmica. Isto significa que um aumento na força da fonte por um factor dois (duas vezes mais energia de som) resultaria somente num aumento de 3 dB e pode ser demonstrado a partir da Equação 2.3 [Wayson, 1998]:

Equação 2.3:

$$L_{total} = 10 \log_{10} \sum_{i=1}^n 10^{L(i)/10}$$

em que:

L_{total} é o nível de pressão sonora total (dB);

$L(i)$ refere-se ao nível de pressão sonora das fontes individuais (dB).

Em laboratório, um ouvido saudável normal pode distinguir uma mudança de sonoridade quando ocorre uma variação do nível de pressão sonora (SPL) de cerca de 3 dB. Ao ar livre, a percepção de uma alteração de sonoridade é geralmente superior a 3 dB, sendo 5 dB a situação usual. 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 [Wayson, 1998].

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. Na Figura 2.5 apresenta-se a relação da variação do nível de ruído com a redução do volume de tráfego [Raitanen, 2005]. 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%.

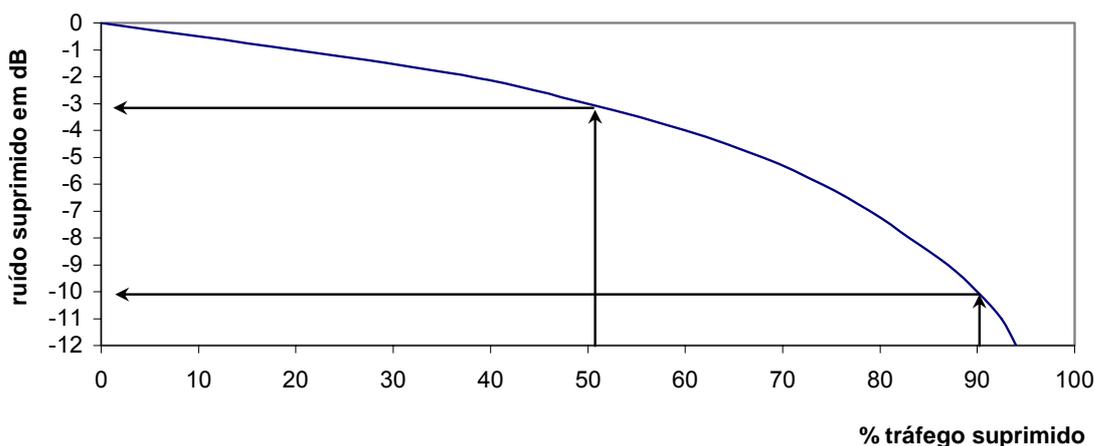


Figura 2.5 – Decréscimos do nível de pressão sonora função do decréscimo de volume de tráfego [Raitanen, 2005]

O som pode ainda ser caracterizado pelo nível de potência sonora. A potência sonora representa a velocidade a que se transmite a energia pelas ondas sonoras, tendo como referência o valor de 10^{-12} Watts (Equação 2.4 – Kiely, 1999). À semelhança do nível sonoro, o nível de potência sonora também se mede em decibéis.

Equação 2.4:

$$L_w = 10 \log_{10} \frac{W}{10^{-12}}$$

em que:

L_w é o nível de potência sonora (dB);

W é a potência sonora da fonte de ruído em Watts (W)

2.2 Frequência

O ouvido detecta também uma larga escala de frequências. Um ouvido saudável pode detectar flutuações de pressão do som de cerca de 20 vezes por segundo até 20 000 vezes por segundo. Assim, o ouvido humano normal, saudável, pode ouvir de 20 Hertz a 20 quilo Hertz (KHz) (Figura 2.6).

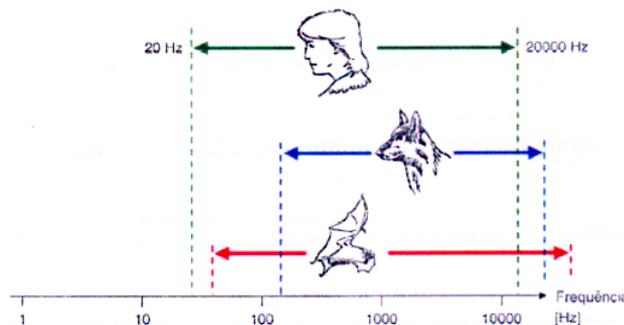


Figura 2.6 – Gama auditiva [Gonçalves, 2005]

Mais uma vez, como mecanismo de protecção, os nossos ouvidos 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. Dá-se o nome de oitava ao conjunto de notas que vai do dó de uma escala ao dó da escala seguinte. Em alguns casos poderá ser necessário utilizar escalas de frequência ainda mais restritas, com base em escalas de bandas de oitava mais reduzidas (isto é um terço ou uma doseava de banda de oitava) ou na análise de bandas restritas predefinidas.

Em música, um tom que seja uma oitava acima de outro tem uma frequência equivalente a duas vezes o primeiro tom. As relações de frequência entre notas de uma oitava qualquer estão relacionadas no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Relações de frequência entre notas de uma oitava [Costa, 2003]

Nota musical	Dó	Ré	Mi	Fá	Sol	Lá	Si	Dó
Oitava	1	9/8	5/4	4/3	3/2	5/3	15/8	2
Frequência (Hz)	65,4	73,6	81,8	87,2	98,1	109,0	122,6	130,8

No caso do estudo do ruído produzido pelo tráfego exige-se o uso de bandas de 1/3 de oitava e por vezes superiores, para se poder distinguir a influência dos diferentes mecanismos que interferem com a produção do ruído. Na Figura 2.7 são ilustrados dois tipos de espectro de frequência, para o mesmo som. O espectro em bandas de 1/3 de oitava é mais detalhado, adequando-se às necessidades de estudo do ruído de interacção pneu/pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002].

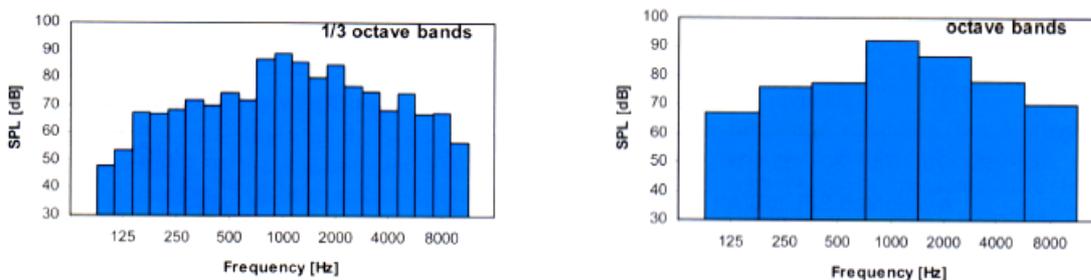


Figura 2.7 – Espectros de frequência em bandas de oitava e 1/3 de oitava [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Os sonómetros incorporam malhas de ponderação electrónica que se aproximam da forma como o ouvido humano capta o som. Foram desenvolvidas quatro malhas que são internacionalmente reconhecidas. A Figura 2.8 abaixo apresenta as malhas de ponderação A, B, C e D [Silva, 1978].

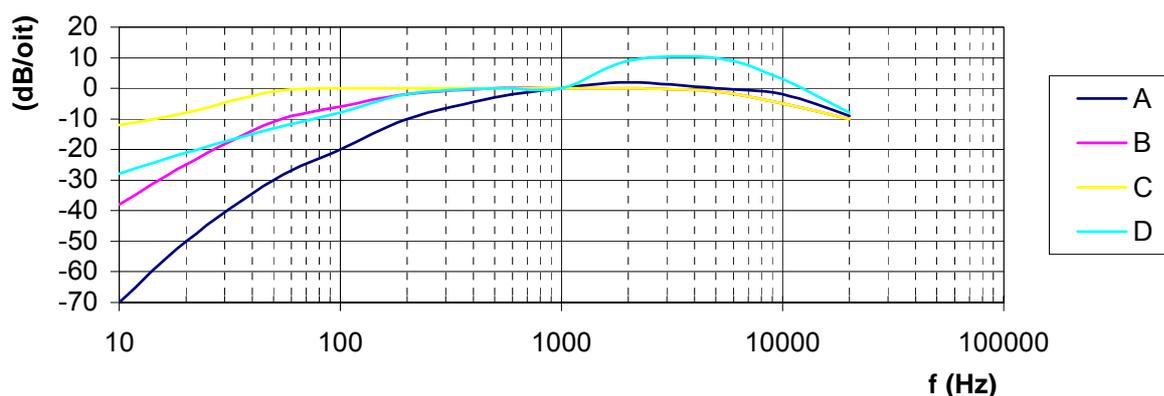


Figura 2.8 – Curvas de resposta das malhas A, B, C e D [Silva, 1978]

Os valores das medições feitas com o emprego das malhas filtrantes A, B, C, e D exprimem-se, respectivamente, em dB (A), dB (B), dB (C) e dB (D). Deve referir-se que o emprego de dB (B) ou dB (C) está hoje praticamente em desuso e que o dB (A) se utiliza com

generalidade para quantificar o ruído de tráfego rodoviário, ruído industrial, ruído de tráfego aéreo, etc.

Com efeito, em estudos sobre a incomodidade produzida por ruído de tráfego rodoviário, a avaliação feita através da malha A é a que se apresenta como mais correcta, independentemente do nível de pressão sonora do estímulo [Silva, 1978].

A título de exemplo são apresentados os espectros em bandas de 1/3 de oitava, filtradas com a malha A, obtidos para um veículo ligeiro e para um veículo pesado em diferentes tipos de pavimentos e a uma velocidade de 50 e 80 Km/h.

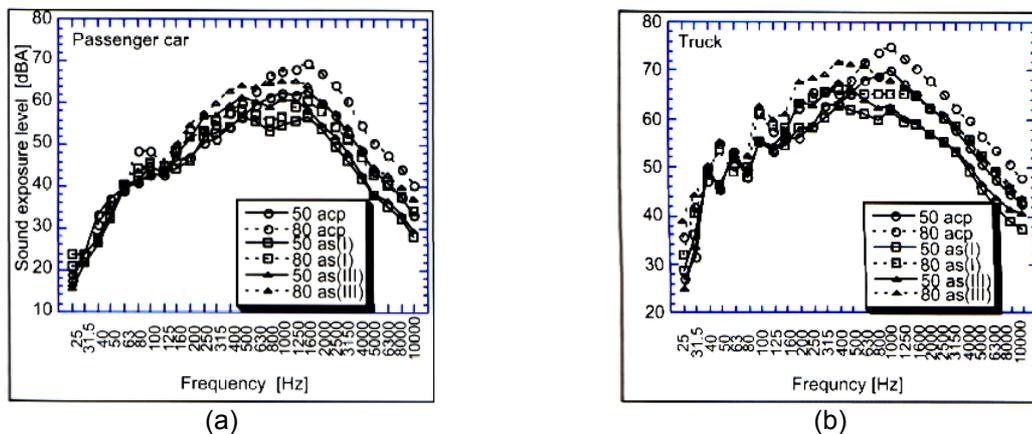


Figura 2.9 – Espectro produzido por um ligeiro (a) e por um pesado (b) [Sandberg and Ejsmont, 2002]

2.3 Indicadores de ruído

Um foguete pode ter uma alta sonoridade, mas dura apenas uma fracção de segundo. O ruído do tráfego pode não ser tão intenso, mas é contínuo. Para falar sobre a duração do som e permitir uma descrição eficaz de como o nível de som varia ao longo do tempo, são usados vários descritores, entre os quais: o nível de ruído máximo (L_{max}), o nível de pressão sonora (L_{xx}) e o nível sonoro contínuo equivalente (L_{eq}). Em cada um destes descritores a letra maiúscula L representa que cada um corresponde a um nível de pressão sonora, e não pressão sonora, embora as unidades sejam as mesmas, o decibel (dB).

O L_{max} representa o nível de ruído máximo que ocorre por um curto período de persistência, durante um intervalo de tempo definido. Assim, L_{max} (1 hora) será um descritor que define a intensidade máxima de ruído que ocorreu por um curto período de tempo, durante uma hora.

O L_{xx} representa um descritor estatístico para o nível de pressão sonora, onde o xx subscrito representa a percentagem de tempo em que o nível é excedido. Por exemplo, um nível de som registado de 60 dB (A) correspondente a L_{10} (1 hora), significaria que um nível de pressão sonora de 60 dB, numa escala de ponderação A, tinha sido excedido em 10 por cento do tempo num período de uma hora.

O valor numérico pode ser qualquer percentagem, mas L_{10} , L_{50} , L_{90} e L_{99} são geralmente mais utilizados. L_{90} é o nível de pressão sonora excedido em 90% do tempo, e é geralmente usado como o nível de fundo próximo das principais fontes de tráfego.

O L_{eq} é o nível sonoro contínuo equivalente. L_{eq} representa o nível sonoro de um ruído uniforme, em dB, que contém a mesma energia sonora que o ruído medido, no intervalo de tempo de referência. Poderá considerar-se L_{eq} como um descritor médio de energia acústica. Deverá notar-se que a energia média não é uma média algébrica do nível de pressão sonora durante um período de tempo, mas uma média logarítmica, devido à natureza logarítmica do dB.

O nível sonoro contínuo equivalente pode ser expresso em dB(A) ou em dB, consoante a análise do ruído seja feita com ou sem a ponderação A. No caso da análise do ruído ser feita com a ponderação A, o nível sonoro contínuo equivalente representa-se por L_{Aeq} e por L_{eq} , no caso contrário [Silva, 1978].

Assim, o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A é expresso pela Equação 2.5 [FEHRL, 2006]:

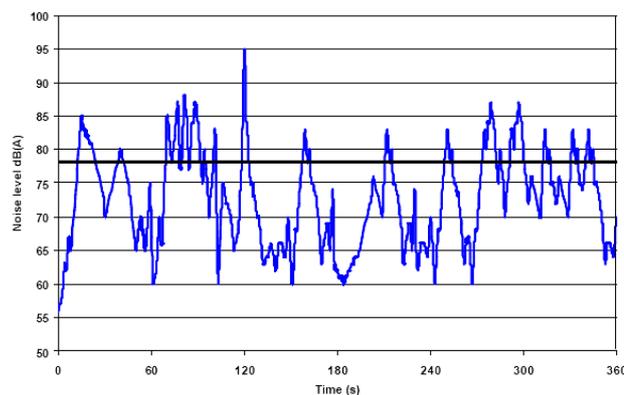
Equação 2.5:

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p(t)^2}{p_o^2} dt \right]$$

em que:

- L_{Aeq} representa o nível sonoro contínuo equivalente ponderado A (dB(A));
- T o período de tempo durante o qual se calcula L_{Aeq} (s);
- p a pressão sonora instantânea ponderada em A (Pa);
- p_o a pressão sonora de referência (2×10^{-5} Pa = 20 μ Pa).

De forma a ilustrar o conceito de L_{Aeq} , a Figura 2.10 apresenta uma variação típica do nível de ruído aferido junto a uma estrada movimentada [FEHRL, 2006].



— Variação no nível de ruído, dB(A), ao longo do tempo.

— Nível de ruído equivalente, num período de 6 minutos = 78.1 LAeq, 6 min. dB.

Figura 2.10 – Variação no nível de ruído rodoviário e o nível de ruído equivalente, L_{Aeq} , dB [FEHRL, 2006]

As flutuações no nível de ruído são registadas à medida que os veículos passam pelo microfone, durante 6 minutos de gravação. O nível constante de 78.1 dB, apresentado na figura, representa o nível de ruído equivalente L_{Aeq} , que ao longo do período, T, de 6 minutos, tem energia acústica igual à recebida da flutuação de ruído rodoviário durante o mesmo período [FEHRL, 2006].

Foram desenvolvidas medidas de ruído compostas, referenciadas como índices ou indicadores de ruído, que embora se baseiem em escalas de ruído, incluem atributos adicionais, importantes para a avaliação do impacto do ruído sobre a comunidade. Estes atributos adicionais podem estar relacionados com uma fonte de ruído específica ou a determinadas situações em que existe interferência do ruído.

Com o objectivo de avaliar o impacto do ruído ambiental sobre as comunidades, incluindo o ruído rodoviário, a União Europeia (UE) recomenda dois indicadores L_{den} e L_{night} para utilização em toda a Europa. Ambos os indicadores de ruído recorrem à escala de ruído L_{Aeq} , como base métrica, mas incluem factores adicionais relativos à fase do dia e à duração da exposição.

Estes indicadores são definidos pela Norma Europeia da seguinte forma [FEHRL, 2006]:

Equação 2.6:

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left[12 * 10^{\frac{L_{day}}{10}} + 4 * 10^{\frac{L_{evening} + 5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_{night} + 10}{10}} \right]$$

em que:

- L_{den} é o indicador de ruído (diurno-entardecer-nocturno) (dB(A));
- L_{day} é o nível de som de ponderação A equivalente, para o período diurno de 12 horas, das 07:00 às 19:00 horas, determinado ao longo de um ano (inclui todos os períodos diurnos desse ano) (dB(A));
- $L_{evening}$ é o nível de som de ponderação A equivalente, para o período de 4 horas do fim da tarde, das 19:00 às 23:00, determinado ao longo de um ano (inclui todos os períodos de fim de tarde desse ano) (dB(A));
- L_{night} é o nível de som de ponderação A equivalente, para o período nocturno de 8 horas, das 23:00 às 07:00, determinado ao longo de um ano (inclui todos os períodos nocturnos desse ano) (dB(A));

Na Equação 2.6 foi aplicada uma ponderação de 5 e 10 dB ao $L_{evening}$ e L_{night} , respectivamente, de forma a permitir considerar as diferenças ao nível do incómodo sentido conforme o período do dia.

L_{night} é utilizado na aferição de perturbações do sono, mas não inclui a ponderação de 10 dB aplicada para determinar a L_{den} .

Deverá registar-se que o início do período diurno (e subsequentemente o início dos períodos de entardecer e noite) será estabelecido individualmente pelos Estados Membros, havendo flexibilidade para encurtar o período do fim de tarde numa ou duas horas e aumentar a duração dos períodos nocturno e diurno em conformidade. Em Portugal, o período diurno foi alterado para 13 horas e o período de entardecer para 3h.

2.4 Geração do ruído rodoviário

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 pneu/pavimento e o ruído aerodinâmico (Figura 2.11).

O ruído do motor (unidade de potência), o ruído pneu/pavimento e o ruído da turbulência do vento 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..

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 de modo a avaliar esta fonte de ruído.

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

- a) Mecânicos e
- b) Aerodinâmicos.

Contudo, o ruído da interacção pneu/pavimento é um fenómeno complicado visto que há muitos de 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 [Sainio, 2003]. Nos capítulos adiante, estes factores serão abordados com maior detalhe.

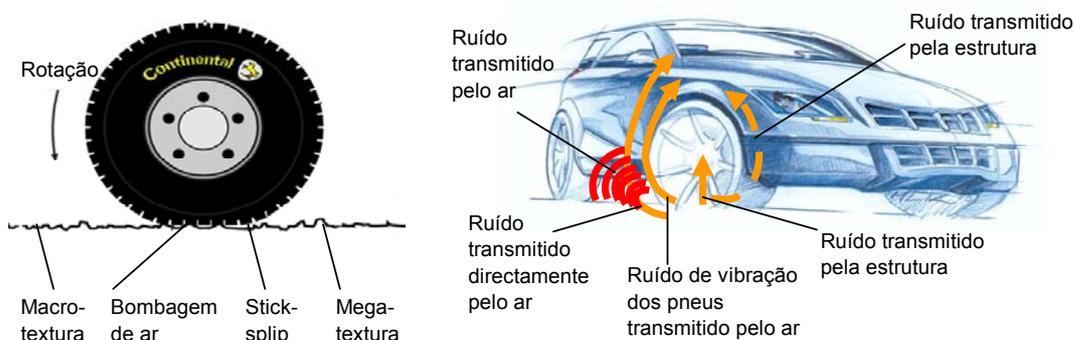


Figura 2.11 – Fontes do ruído rodoviário: interacção pneu/pavimento (à esquerda) e funcionamento do veículo (à direita)

Bendtsen and Andersen (2005), referem que para velocidades acima dos 40 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 (60 – 70 Km/h). No entanto, num estudo apresentado por Sanz (2006), é referido que no caso de veículos ligeiros circulando até 50 ou 60 Km/h, a influência na geração de ruído é predominantemente do motor sendo que a velocidades mais elevadas predomina o ruído pneu/pavimento. Este limite é de 70 ou 80 Km/h para os veículos pesados.

2.5 Mecanismos de geração mecânica

Os mecanismos de geração mecânica são classificados 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 Figura 2.12 são ilustrados estes mecanismos.

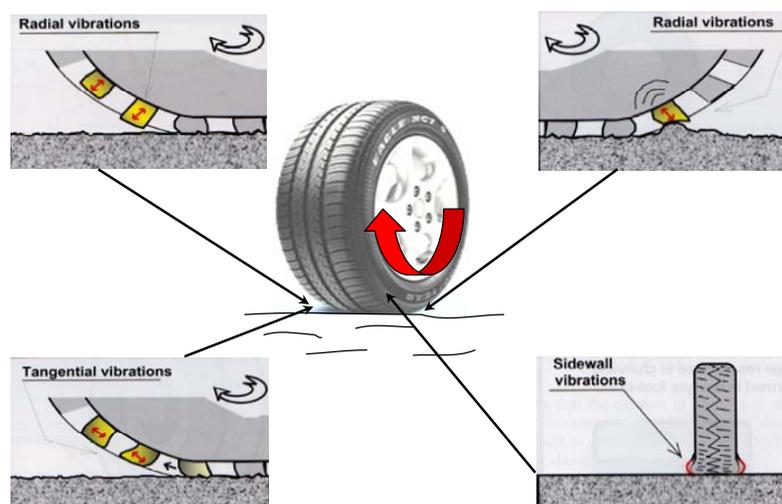


Figura 2.12 – Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações radiais, tangenciais e da parede lateral [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Na Figura 2.13 são exemplificadas as vibrações *stick-slip* e *stick-snap*. 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 [Kuijpiers et al., 2001].

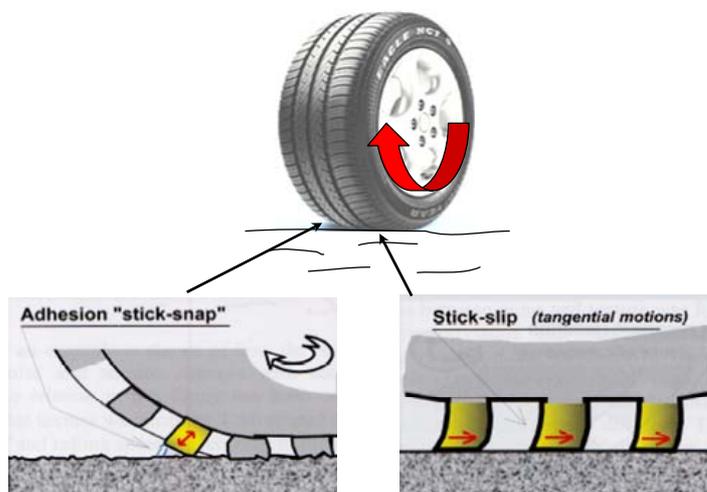


Figura 2.13 – Mecanismos mecânicos do ruído pneu/pavimento – vibrações *stick-snap* e *stick-slip* [Sandberg and Ejsmont, 2002]

2.6 Mecanismos de geração aerodinâmica

Os mecanismos de geração aerodinâmica (Figura 2.14) 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.

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 [Kuijpiers et al, 2001].

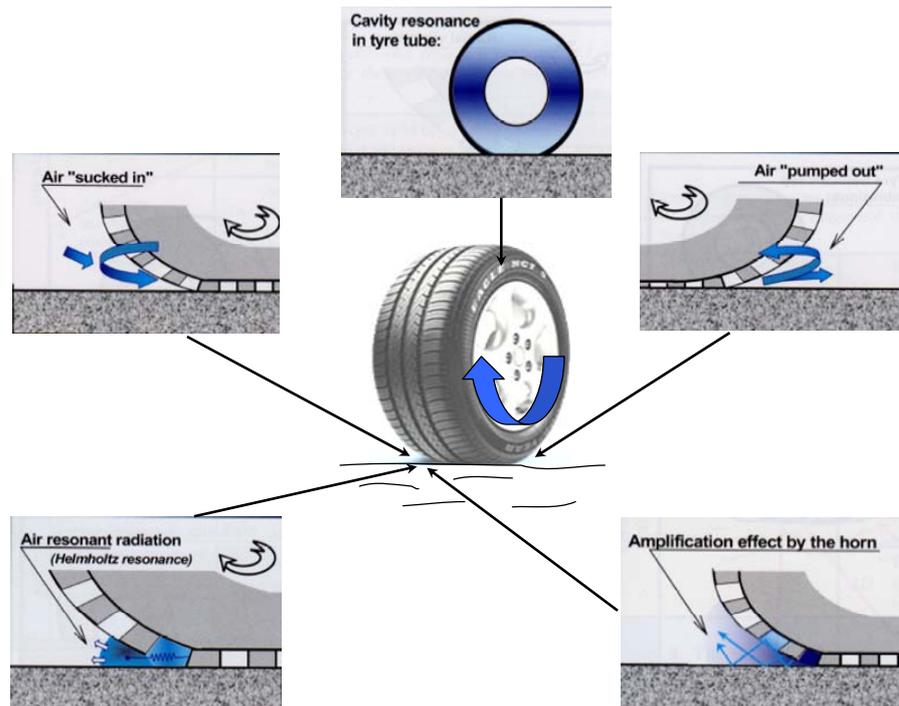


Figura 2.14 – Mecanismos aerodinâmicos do ruído pneu/pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Alguns destes mecanismos de emissão de ruído podem ser afectados pelas características da superfície do pavimento e dos pneus, pelo comportamento dos condutores e pelo clima.

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 hertz 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 hertz [Nilson et al., 1980].

Na Figura 2.15 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).

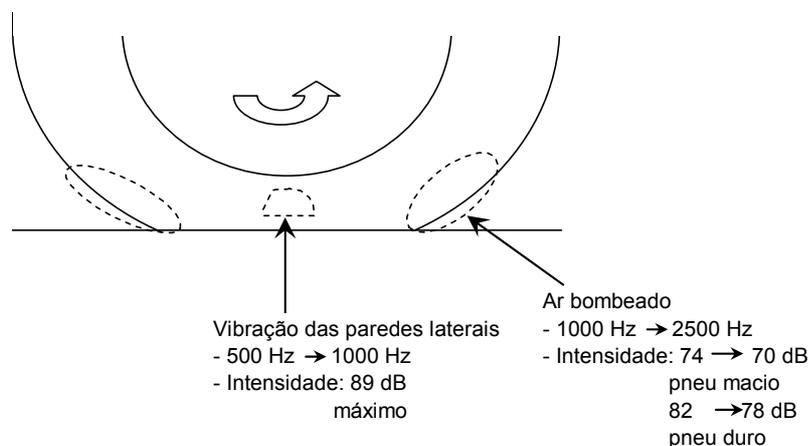


Figura 2.15 – Mecanismos de ruído [Donovan et al., 1980]

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. Isto ocorre no limite de condução e seguimento da zona de contacto do pneu e origina as mais elevadas escalas de frequência de som, como demonstrado na Figura 2.15. No entanto, o som 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.

As superfícies silenciosas 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 [Hamet, 2000].

2.7 Propagação do ruído rodoviário

Quando se fala da propagação do ruído a partir de uma fonte localizada, um factor importante a ter em conta é a distância entre a fonte e o receptor. Os níveis sonoros de uma fonte localizada diminuem de acordo com a lei do inverso do quadrado da distância, que constitui uma lei fundamental da acústica. De acordo com esta lei, o nível sonoro varia de forma inversa ao quadrado da distância. À medida que a distância aumenta, o nível de ruído diminui.

Para uma fonte de ruído localizada, como por exemplo uma misturadora, o factor de atenuação é de 6 dB(A) com uma distância duplicada em relação à fonte. Com a triplicação da distância, será de 9.5 dB(A). Assim, se uma misturadora tem um nível de ruído de 85 dB(A) a um metro, terá 79 dB(A) a dois metros e 75.5 dB(A) a três metros. A Figura 2.16 ilustra este fenómeno [Hanson, 2005].

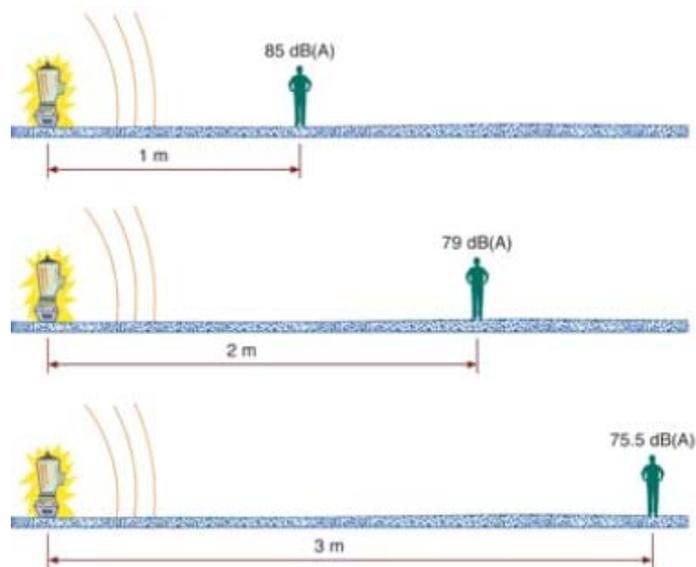


Figura 2.16 – Efeito da distância sobre uma fonte de ruído localizada [Hanson, 2005]

A relação entre o nível sonoro a distâncias diferentes de uma fonte pontual pode ser determinada a partir da seguinte Equação 2.7 [Harris, 1979]:

Equação 2.7:

$$L_A = L_{ref} - 20 \log (r/r_{ref})$$

em que:

- L_A é o nível sonoro a uma distância r (dB);
- L_{ref} é o nível sonoro de referência (dB);
- r é a distância entre fonte do ruído e o receptor (m);
- r_{ref} é a distância de referência (m).

O ruído proveniente do fluxo de tráfego actua de forma diferente. Neste caso, o ruído é devido a um grande número de fontes espaçadas ao longo da estrada. Assim, o ruído é classificado como fonte em linha, uma vez que o ruído é transmitido ao longo de todo o comprimento da estrada.

À medida que a distância à fonte em linha aumenta, o nível sonoro diminui num grau inferior ao do caso de uma única fonte localizada. Isto deve-se ao facto de o ruído das fontes mais afastadas na linha, começar a contribuir mais em comparação com o ruído das fontes individuais mais próximas. O resultado líquido indica que, idealmente para uma fonte em linha, uma duplicação da distância resulta numa redução do nível de ruído em 3 dB(A), em vez de 6 dB(A).

Assim, se um ponto se encontra localizado à distância de 3 m do centro da fonte de ruído (centro da faixa de rodagem) da estrada e registar um nível de ruído de 85 dB(A), um ponto localizado a 9 m da berma da estrada registará um nível de ruído de 82 dB(A). Este fenómeno é ilustrado na Figura 2.17 [Hanson, 2005].

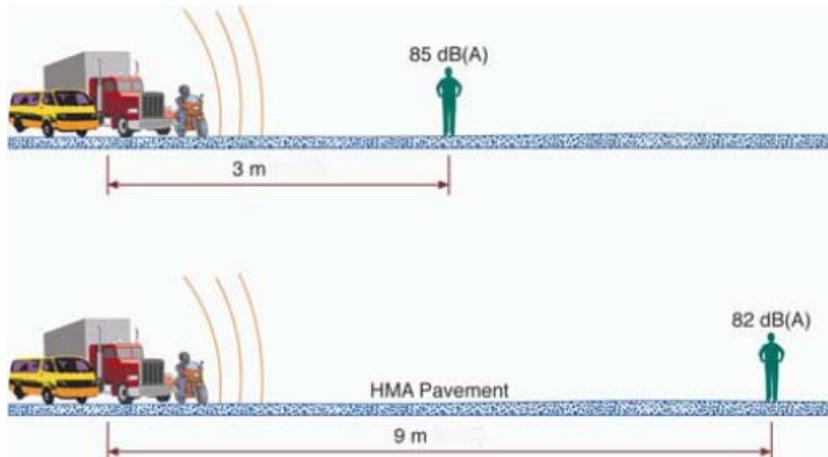


Figura 2.17 – Efeito da distância sobre uma linha de fontes de ruído situada ao longo de uma superfície pavimentada [Hanson, 2005]

De modo semelhante ao de uma fonte pontual, a relação entre o nível sonoro a distâncias diferentes de uma fonte em linha pode ser determinada a partir da Equação 2.8 [Harris, 1979]:

Equação 2.8:

$$L_A = L_{ref} - 10 \log (r/r_{ref})$$

em que:

- L_A é o nível sonoro a uma distância r (dB);
- L_{ref} é o nível sonoro de referência (dB);
- r é a distância entre fonte do ruído e o receptor (m);
- r_{ref} é a distância de referência (m).

A propagação do som através da atmosfera é função de vários mecanismos de atenuação. Assim, considera-se a existência de 4 mecanismos de atenuação:

- atenuação causada pela divergência geométrica da fonte ($A_{div.}$), incluindo as restrições das superfícies reflectoras;
- atenuação atmosférica ($A_{atm.}$), devida à absorção da energia acústica pelo ar onde as ondas sonoras se propagam;
- atenuação do efeito do solo ($A_{excesso}$), a qual é causada principalmente pela propagação à superfície (*Ground effect*);
- atenuação que resulta da colocação de uma barreira entre a fonte e o receptor ($A_{barreira}$).

Deste modo, o nível de pressão sonora num ponto receptor depende do nível de potência da fonte sonora, incluindo a sua direccionalidade e localização face às superfícies limítrofes, e

da atenuação ao longo da trajectória de transmissão. A Equação 2.9 [Harris,1979] define o nível sonoro em bandas de oitava, onde (oct) significa uma particular banda de oitava de ruído e (ref) significa o conhecido nível de curta distância (R_{Ref}) a partir da fonte.

Equação 2.9:

$$L_{oct} = L_{oct_{ref}} - (A_{oct_{div.}} + A_{oct_{barreira}} + A_{oct_{atm}} + A_{oct_{excesso}})$$

em que:

L_{oct} é o nível sonoro em banda de oitava (dB);

$L_{oct_{ref}}$ é o nível sonoro de referência em banda de oitava (dB);

$A_{oct_{div}}$ é a atenuação geométrica em banda de oitava (dB);

$A_{oct_{barr}}$ é a atenuação devido a uma barreira em banda de oitava (dB);

$A_{oct_{atm}}$ é a atenuação atmosférica em banda de oitava (dB);

$A_{oct_{exc}}$ é a atenuação devido ao efeito do solo em banda de oitava (dB).

Os níveis em bandas de oitava devem ser combinados para obter o nível sonoro ponderado A , uma vez que assim se pode determinar o nível sonoro (L_A), recorrendo à Equação 2.10:

Equação 2.10:

$$L_A = L_{A_{ref}} - (A_{div.} + A_{barreira} + A_{atm.} + A_{excesso}) \quad [\text{dB(A)}]$$

Em resumo, o nível sonoro num local longe da fonte é obtido através do nível de pressão sonora conhecido num ponto de referência perto da fonte e subtraindo a esse nível, o total de todas as atenuações separadamente.

A norma francesa XP S31-133 de Abril de 2001, “*Acoustique – Bruit des infrastructures de transports terrestres – Calcul de l’atténuation su son lors de sa propagation em milieu extériur, incluant les effets météorologiques*”, estabelece que:

A atenuação devida à divergência geométrica (A_{div}) tem em conta o efeito de enfraquecimento do nível sonoro devido à distância de propagação. Para uma fonte sonora em campo livre, a atenuação em dB e em cada banda de oitava, é dada pela Equação 2.11 [Norma XP S31-133, 2001]:

Equação 2.11:

$$A_{div} \approx 20 \times \log(d) + 11$$

em que:

A_{div} é a atenuação devida à divergência geométrica (dB);

d é a distância directa entre o emissor e o receptor (distância na ausência de obstáculos) (m).

A taxa de absorção do ruído varia com a temperatura e a humidade, mas as variações de pressão têm pouco efeito. Deste modo, a atenuação resultante da absorção atmosférica (A_{atm}), resulta aquando da propagação sobre uma distância d em metros, e é dada pela Equação 2.12 [Norma XP S31-133, 2001]:

Equação 2.12:

$$A_{atm} = \frac{\alpha * d}{1000}$$

em que:

A_{atm} é a atenuação resultante da absorção atmosférica (dB);

d é a distância directa entre o emissor e o receptor (m);

α é o coeficiente de atenuação atmosférica (em dB/Km) à frequência central exacta para cada banda de oitava, de acordo com o Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Coeficiente de absorção atmosférica (em dB/Km) por banda de oitava [Norma XP S31-133, 2001]

Frequência central nominal (em Hz)	125	250	500	1 000	2000	4000
α (em dB / Km)	0,38	1,13	2,36	4,08	8,75	26,4

Os valores do coeficiente α , referidos no Quadro 2.2, são dados para uma temperatura de 15°C e uma humidade relativa de 70%. Estas são consideradas como representativas das condições climáticas metropolitanas e encontram-se em conformidade com os valores fornecidos pela norma ISO 9613-1:1993.

A taxa de absorção de ruído em função da distância depende da frequência da fonte de ruído pelo que, a atenuação atmosférica em geral é relativamente pequena em comparação com as atenuações devido a outros factores, excepto nas frequências mais altas.

A atenuação devida ao efeito do solo/superfície ($A_{excesso}$) está essencialmente relacionada com a sua porosidade. Os solos compactos são normalmente reflectores e os porosos, absorventes.

Quando uma fonte e um receptor se encontram acima de uma superfície plana, ocorrem reflexos a partir do plano do solo, no entanto, quando a superfície é perfeitamente reflectora, o raio acústico reflectido parece provir de uma imagem de fonte localizada abaixo da superfície do solo, como demonstra a Figura 2.18 (a). Quando a camada de superfície é porosa, poderá ser necessário considerar factores adicionais. A Figura 2.18 (b) apresenta os percursos principais dos raios acústicos que regem a propagação das ondas de uma fonte ao receptor localizado acima de uma superfície com camada porosa [FEHRL, 2006].

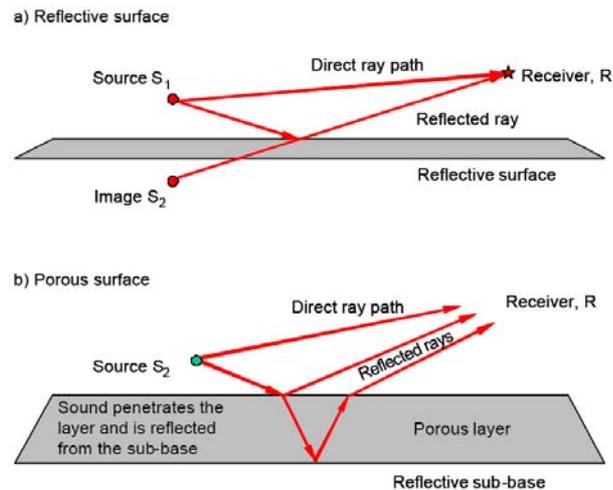


Figura 2.18 – Geometria para uma fonte e receptor nas imediações de um plano do solo [FEHRL, 2006]

Para determinar a força do campo acústico no receptor, para ambas as situações, torna-se necessário determinar a fase e amplitude das ondas directas e reflectidas, combinando depois estes componentes e registando quaisquer interferências das fases que ocorram. Os factores importantes que afectam esta combinação são o tipo de solo (que, se poroso, pode ter um efeito significativo sobre a fase das ondas reflectidas), a altura da fonte e do receptor e a distância da fonte ao receptor.

Para as necessidades operacionais de cálculo, a absorção acústica de um solo é representada por um coeficiente G adimensional, compreendido entre 0 e 1 (Quadro 2.3). Dois tipos de solo se distinguem: um valor de 0 corresponde a um solo reflector, e um valor de 1 a um solo absorvente. O coeficiente G pode tomar os valores intermediários entre 0 e 1, para representar uma absorção equivalente no caso de solos variáveis ao longo do trajecto.

Quadro 2.3 – Coeficiente de absorção do solo (G) [Norma XP S31-133, 2001]

Tipo de solo	G (adimensional)
Solo absorvente (erva, pradaria, solo em florestas, etc.)	1
Solo reflector (pavimento rodoviário, betão, etc.)	0

Para uma superfície altamente reflectora, ou seja com baixa porosidade, e quando a diferença de percurso entre as ondas directas e as reflectidas é pequena, a interferência só ocorre a frequências relativamente altas e pode ser ignorada na maioria das aplicações práticas. Nestas condições, os sons que chegam dos dois percursos adicionam-se para dar um aumento de 6 dB(A). Quando a camada de superfície é porosa, ou quando a diferença do comprimento do percurso é elevada, a interferência ocorre geralmente em frequências mais baixas. As frequências e amplitudes destes importantes efeitos de interferência

dependem grandemente das propriedades acústicas da camada da superfície e do ângulo de incidência da onda reflectida [FEHRL, 2006].

De forma a ter em consideração, a realidade do relevo do terreno ao longo do trajecto de propagação, as fórmulas de cálculo do efeito do solo utilizam como parâmetros não as alturas reais dos pontos de emissão e recepção, mas as suas alturas equivalentes sobre o nível médio do solo. Convencionalmente, as alturas verdadeiras sobre o solo são registadas como «h» e as alturas equivalentes como «z».

As alturas equivalentes são obtidas a partir de um plano médio entre o emissor e o receptor: desta forma, substitui-se o solo real por um solo plano fictício que representa o perfil médio do terreno (Figura 2.19). Assim, é possível definir a altura equivalente (altura ortogonal em relação a esse plano) do emissor (z_s) e a altura equivalente do receptor (z_r).

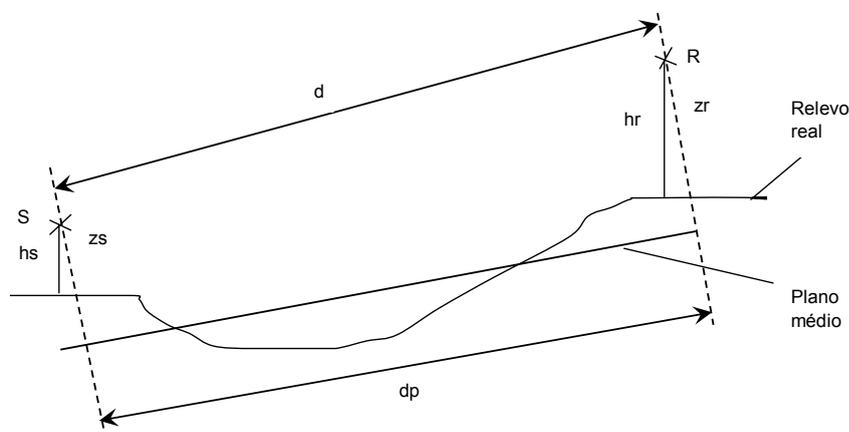


Figura 2.19 – Alturas equivalentes em relação ao solo [Norma XP S31-133, 2001]

O plano médio do solo pode ser obtido através de uma regressão, de acordo com o método de mínimos quadrados, aplicada sobre o perfil do solo compreendido entre o emissor e o receptor. Se a altura de um ponto se torna negativa, (significa que o ponto se situa sob o plano médio do solo), a altura equivalente desse ponto é tomada como igual a zero.

A atenuação do solo também é função das condições atmosféricas. Deste modo, as atenuações podem ser calculadas considerando condições favoráveis ou homogéneas. Em condições favoráveis à propagação, os raios sonoros surgem curvados em direcção ao solo pelo que, o efeito do solo é essencialmente condicionado pela natureza dos terrenos próximos do emissor e próximos do receptor. No entanto, para grandes distâncias, o trajecto de propagação pode “ressaltar” sobre os terrenos situados entre o emissor e o receptor, o que deverá ser tido em conta. Nas condições atmosféricas homogéneas, os raios sonoros são rectilíneos pelo que não é pertinente distinguir especificamente as zonas de emissão, intermédias e de recepção.

Para calcular a atenuação devida ao efeito do solo em condições favoráveis ou homogéneas deverão ser aplicadas as fórmulas apresentadas na referida norma.

Também é possível minimizar a transmissão do som através de uma barreira. A atenuação devida às barreiras (A_{barreira}), é efectuada normalmente com base em variadas curvas tipo e regras práticas [Kiely, 1999], sendo os valores para a previsão da atenuação por estes procedimentos, normalmente de cerca de 10 dB. Na prática, as atenuações das barreiras acústicas raramente excedem os 10 a 15 dB [Kiely, 1999].

Para que as barreiras sejam eficazes devem estar o mais próximo possível da fonte do ruído. Além disso, deverão ser suficientemente altas e compridas para assegurar que as ondas sonoras não contornam a parte superior e as faces laterais. É importante garantir também que não existam fissuras ou aberturas numa barreira porque poderá vir a ser diminuída a atenuação prevista. Deve-se assinalar que a atenuação atribuída aos efeitos do solo se perde em grande parte quando se insere uma barreira, devido à elevação do nível da nova fonte de ruído efectiva (parte superior da barreira).

O cálculo da atenuação sonora das barreiras de comprimento finito poderá ser efectuada com base em métodos exactos ou empíricos pelo que, para uma maior informação poderá ser consultada a Norma XP S31-133 (2001) ou o Modelo “Harmonoise” [www.dft.gov.uk/pgr/roads/environment].

A determinação das características intrínsecas das barreiras acústicas, isto é, a determinação da absorção, do isolamento sonoro aéreo, de difracção e de reflexão tem sido objecto de estudo do Comité Europeu de Normalização (CEN). O CEN tem publicado desde 1997 um conjunto de normas relativas à realização de ensaios laboratoriais e *in situ* com vista à determinação destas características, as quais permitem definir com fiabilidade a atenuação proporcionada por um determinado tipo de barreira num determinado ponto.

Esse conjunto de normas, aborda os dispositivos de redução do ruído do tráfego rodoviário quanto aos métodos de ensaio para determinar o desempenho acústico, sendo constituído pelas seguintes:

- EN 1793-1 (1997): características intrínsecas da absorção acústica;
- EN 1793-2 (1997): características intrínsecas de isolamento sonoro aéreo;
- EN 1793-3 (1997): espectro normalizado de tráfego;
- CEN/TS 1793-4 (2003): características intrínsecas: valores locais da difracção do som;
- CEN/TS 1793-5 (2003): características intrínsecas: valores de reflexão sonora e isolamento sonoro aéreo no local.

Embora algumas destas normas tenham quase 10 anos, em Portugal apenas se encontra publicada a norma EN 1793-1, desde 2005.

Como resultado da Directiva Europeia de Ruído Ambiental n.º 2002/49/EC, transposta pelo Decreto-Lei n.º 146/2006, os estados membro devem, a partir de 2007, produzir mapas de ruído dos principais aglomerados, estradas, caminhos-de-ferro e aeroportos. Nesta primeira

fase, a preparação de mapas de ruído poderá ser efectuada com os métodos nacionais existentes ou com os designados métodos europeus provisórios, com base numa selecção dos métodos nacionais mais adequados. Porém, na segunda fase da criação dos mapas de ruído, em 2012, estes deverão ser elaborados aplicando os métodos europeus de avaliação harmonizada.

Esta avaliação harmonizada poderá ser executada por dois modelos de previsão de impacto de ruído: um modelo de engenharia destinado a uso diário e um modelo de referência que servirá como base de calibração para o modelo de engenharia e como modelo de elevada exactidão para problemas de propagação complexos que não seja possível resolver de forma satisfatória com o modelo de engenharia. Ambos poderão funcionar com o mesmo modelo de fonte, mas os métodos para modelar a propagação serão substancialmente diferentes. Um dos princípios básicos desta abordagem consiste na separação das definições, quanto à fonte e ao fenómeno de propagação.

O modelo de referência baseia-se em métodos teóricos e físicos de modelagem e foi concebido para atingir a máxima exactidão possível. O motivo para esta opção prendeu-se com o facto de qualquer modelo baseado em dados empíricos ou aproximações teóricas, perder a sua validade em situações não abrangidas pelos dados de medição ou pelos pressupostos de aproximação. Por outro lado, o modelo de engenharia foi concebido para utilização de rotina em grande escala e centra-se essencialmente no cálculo da velocidade e na versatilidade; a exactidão da previsão deverá ser suficiente, não tendo no entanto que atingir o nível máximo [Roo and Noordhoek, 2004].

Esta escolha de modelos possíveis permitirá uma variedade de geometrias na região da fonte, das quais a Figura 2.20 fornece um panorama geral. Fora da região da fonte, é possível uma variabilidade geométrica e geográfica. Nesta região, o modelo poderá comportar um obstáculo, barreira de secção transversal rectangular, um perfil de terreno com uma inclinação máxima de 30 graus e uma ou mais transições de impedância do solo. A Figura 2.21 apresenta exemplos das possibilidades de métodos de modelagem. Nestes modelos, todos os elementos de propagação deverão ser infinitamente longos [Roo and Noordhoek, 2004].

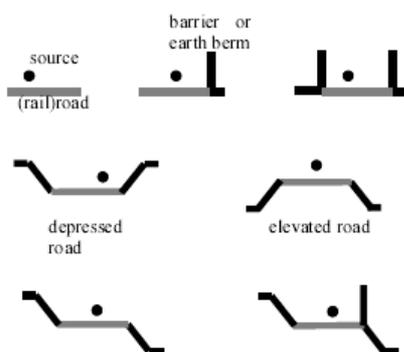


Figura 2.20 – Possíveis geometrias na fonte [Roo and Noordhoek, 2004]

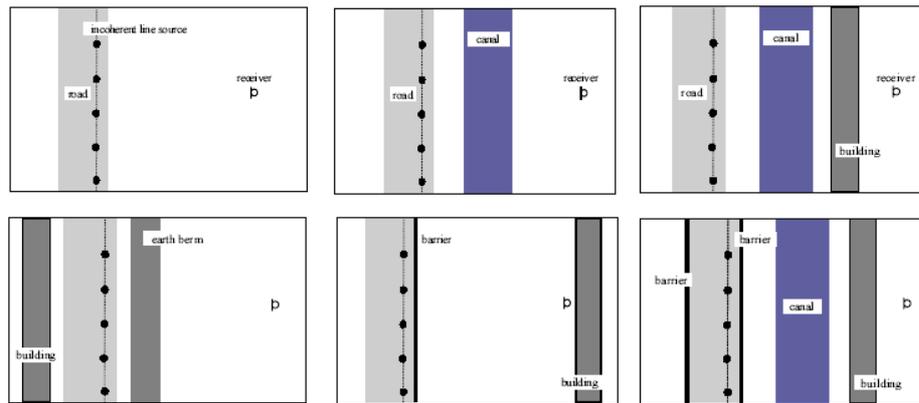


Figura 2.21 – Possíveis modelos geométricos e geográficos [Roo and Noordhoek, 2004]

Além disso, o modelo de referência permitirá calcular níveis de ruído para 25 classes meteorológicas bem como, a impedância do solo e de outras superfícies absorventes, tais como o betão poroso, o betuminoso e materiais fibrosos absorventes, dependendo do grau de detalhe e informação disponíveis para a caracterização do absorvente.

2.8 Sonómetros e tipos de sonómetros

O sonómetro é um instrumento desenhado para medir níveis de pressão sonora de forma normalizada. Um sonómetro é composto por um microfone, um pré-amplificador, um processador principal e uma unidade de leitura. O microfone é um dos elementos mais importantes do sonómetro e é o que determina o tipo de instrumento.

O processamento do sinal inclui a aplicação de ponderações em frequência e em tempo, especificados em normas internacionais, como por exemplo a CEI 61672-1 (2003). Como referido anteriormente a ponderação para o ruído rodoviário é a A.

A ponderação em tempo específica a forma como o sonómetro reage a alterações na pressão sonora. As ponderações em tempo Rápida (Fast), Lenta (Slow) e Impulso (Impulse) (ou F, S e I), são as ponderações exigidas de acordo com a grande maioria das normas e directrizes nacionais e internacionais. Na Figura 2.22 é apresentado um exemplo destas ponderações [Gonçalves, 2005].

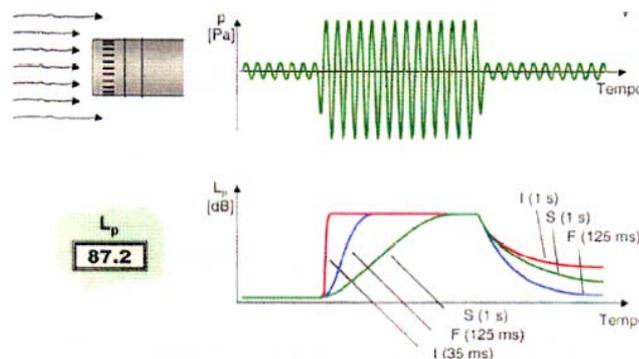


Figura 2.22 – Ponderações em tempo [Gonçalves, 2005]

Uma vez o sinal processado pelos filtros de ponderação, o nível de pressão sonora daí resultante é mostrado em decibéis (dB), com base na pressão sonora de referência p_0 (2×10^{-5} Pa = $20 \mu\text{Pa}$).

Existem 2 tipos principais de sonómetros para medir níveis de ruído, que diferem muito entre si.

a) Sonómetros gerais

Apresentam o nível de pressão sonora instantâneo em decibéis (dB), o que normalmente se conhece como nível de ruído.

Estes instrumentos são úteis para medir o ambiente sonoro, permitindo uma poupança de tempo reservando os sonómetros de gamas superiores para as medições onde seja necessário obter maior precisão ou efectuar relatórios.

b) Sonómetros integradores-promediadores

Estes sonómetros têm a capacidade de calcular o nível contínuo equivalente L_{eq} . Incorporam funções para a transmissão de dados, cálculo dos percentis e algumas análises em frequência.

Os sonómetros podem ser classificados em três classes de precisão:

- Classe 0, para situações de referência em laboratório;
- Classe 1, para medições com níveis de precisão, geralmente usado para medições de campo exactas;
- Classe 2, para medições em indústria ou trabalhos em campo não críticos.

Esta classificação depende do grau de precisão. Assim, a classe 0 corresponde a um grau de precisão mais elevado (tolerâncias mais pequenas) e a classe 2 ao de menor precisão.

De igual modo, os calibradores dividem-se nas mesmas classes dependendo do seu nível de precisão e da capacidade de manter esse mesmo nível estável, para que as medidas efectuadas com o sonómetro não fiquem desvirtuadas por uma calibração incerta.

As normas internacionais que regulam os sonómetros e os calibradores são as da Comissão Electrotécnica Internacional (IEC) 60651 e o ANSI 1.43, para o caso norte-americano [www.ruidos.org/documentos/sonometros.html].

2.9 Métodos de avaliação do ruído

A avaliação do ruído de tráfego pode ser feita sobre 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.

Na outra vertente, vários são os métodos que tem vindo a ser utilizados para a classificação dos pneus bem como, para a comparação de superfícies de estradas, relativamente à sua emissão de ruído. De entre os métodos mais utilizados destacam-se os seguintes:

- a) Para as superfícies de estrada:
 - i. Método Estatístico de passagem (SPB);
 - ii. Método da estrada proximidade (CPX);
 - iii. Método da passagem controlada (CPB);
 - iv. Método da superfície estendida.
- b) Para classificação dos pneus:
 - v. Método Cost-By (CB) /Método do motor desligado;
 - vi. Método da estrada proximidade (CPX);
 - vii. Método de Reboque Cost-By (TCB);
 - viii. Método do Tambor (DR) [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Estes métodos de aferição do ruído cumprem os requisitos básicos para atingir resultados sob condições de teste realistas. A principal excepção diz respeito à técnica de tambor de laboratório (DR). Esta técnica, simplesmente, não permite reproduzir condições reais, devido aos efeitos produzidos pela curvatura do tambor sobre a zona de contacto e pelas inerentes dificuldades para reproduzir superfícies de estrada reais sobre o tapete de rolamento do tambor [Phillips et al, 2003].

Estes métodos de aferição serão abordados a seguir.

2.9.1 Ruído ambiental

A previsão e controlo da poluição sonora, em Portugal, efectuavam-se através da aplicação do Decreto-Lei n.º 292/2000, sendo recentemente introduzido o Decreto-Lei n.º 146/2006, que transpõe a Directiva n.º 2002/49/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 25 de Junho. Este Decreto-Lei tem como objectivo prevenir e reduzir os efeitos prejudiciais da exposição ao ruído ambiente. Além disso, veio estabelecer a obrigatoriedade de efectuar a recolha de dados acústicos nos vários Estados membros e de elaborar relatórios sobre o ambiente acústico ao nível comunitário, de forma a criar uma base para a definição de uma futura política comunitária neste domínio e garantir uma informação mais ampla ao público. Actualmente, o Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro, veio actualizar, articular e conferir coerência entre o novo Regulamento Geral do Ruído com outras normas e/ou regimes jurídicos.

Assim, o Decreto-Lei n.º9/2007 estabelece o regime de prevenção e controlo da poluição sonora visando a salvaguarda da saúde humana e o bem-estar das populações. Este diploma legal aplica-se ao ruído de vizinhança e às actividades ruidosas, permanentes ou temporárias, susceptíveis de causar incomodidade. O critério de incomodidade preconizado é o seguinte:

“A diferença entre o valor do indicador LAeq do ruído ambiente determinado durante a ocorrência do ruído particular da actividade ou actividades em avaliação e o valor do indicador LAeq do ruído residual, diferença que não pode exceder 5 dB(A) no período diurno, 4 dB(A) no período de entardecer e 3 dB(A) no período nocturno,”

As actividades abrangidas são:

- a) Construção, reconstrução, ampliação, alteração ou conservação de edifícios;
- b) Obras de construção civil;
- c) Laboração de estabelecimentos industriais, comerciais ou de serviços;
- d) Equipamentos para utilização no exterior;
- e) Infra-estruturas de transporte, veículos e tráfego;
- f) Espectáculos, diversões, manifestações desportivas, feiras e mercados;
- g) Sistemas sonoros de alarme.

O indicador de ruído preconizado é o ruído diurno-entardecer-nocturno (L_{den}) sendo definido, para as condições portuguesas, pela Equação 2.13 [Decreto-Lei n.º9/2007]:

Equação 2.13:

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left[13 * 10^{\frac{L_d}{10}} + 3 * 10^{\frac{L_e+5}{10}} + 8 * 10^{\frac{L_n+10}{10}} \right] \quad [\text{dB(A)}]$$

em que:

- L_{den} é o indicador de ruído (diurno-entardecer-nocturno) (dB(A));
- L_d é o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na norma NP 1730 1:1996, ou na versão actualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos diurnos representativos de um ano, sendo que, o período diurno corresponde a treze horas (das 7 às 20 horas) (dB(A));
- L_e é o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na norma NP 1730-1:1996, ou na versão actualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos do entardecer representativos de um ano, considerando o período do entardecer em três horas (das 20 às 23 horas) (dB(A));
- L_n é o nível sonoro médio de longa duração, conforme definido na norma NP 1730-1:1996, ou na versão actualizada correspondente, determinado durante uma série de períodos nocturnos representativos de um ano, tomando o período nocturno como oito horas (das 23 às 7 horas) (dB(A)).

A altura dos pontos de avaliação do indicador L_{den} devem sempre que tecnicamente possível, estar afastados, pelo menos de 3,5 m de qualquer estrutura reflectora, à excepção

do solo, e situar-se a uma altura de 3,8 m a 4,2 m acima do solo, quando aplicável, ou de 1,2 m a 1,5 m de altura acima do solo ou do nível de cada piso de interesse, nos restantes casos. De acordo com o estabelecido no Decreto-Lei n.º 146/2006, os valores dos indicadores L_{den} e L_n podem ser determinados quer por metodologia de cálculo quer por medição (no ponto de avaliação). No caso de previsões, apenas é aplicável a metodologia de cálculo.

O método provisório de cálculo dos indicadores L_{den} e L_n para o ruído do tráfego rodoviário é o método de cálculo francês NMPB-Routes-96 (SETRA-CERTU-LCPC-CSTB), publicado no «*Arrêté, du 5 mai 1995 relatif au bruit des infrastructures routières, Journal Officiel, du 10 mai 1995, article 6*», e na norma francesa XPS 31-133 (2001). No que se refere aos dados de entrada relativos à emissão, estes documentos remetem para o «*Guide du bruit des transports terrestres, fascicule prévision des niveaux sonores, CETUR, 1980*».

Em função da classificação de uma zona como mista ou sensível, a instalação de actividades ruidosas permanentes ou temporárias fica condicionada aos valores limites de exposição, apresentados no Quadro 2.4.

Quadro 2.4 – Limites de exposição em função da classificação da zona
[Decreto-Lei n.º 9/2007]

Classificação das zonas	L_{den}	L_n
Zonas Mistas	≤ 65 dB (A)	≤ 55 dB (A)
Zonas Sensíveis	≤ 55 dB (A)	≤ 45 dB (A)
Zonas Sensíveis (próxima de uma grande infra-estrutura em exploração)	≤ 65 dB (A)	≤ 55 dB (A)
Zonas Sensíveis (próxima de uma grande infra-estrutura projectada)	≤ 60 dB (A)	≤ 50 dB (A)

Os conceitos agora apresentados encontram-se descritos no Anexo I.

2.9.2 Ruído pneu/pavimento

a) 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 3 diferentes classes de veículos (ligeiros, pesados com dois eixos e pesados com mais de dois eixos), do tráfego normal que passa no local do teste (Figura 2.23). 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.

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 3 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 [Norma ISO 11819-1: 1997].



Figura 2.23 – Método estatístico de passagem (SPB) [Hanson et al., 2005]

As principais vantagens deste método 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.

b) Método da estrita proximidade (CPX) / Caracterização muito próxima

Este método é executado de acordo com a Norma ISO/DIS 11819-2: 2000: “*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 (Figura 2.24).

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) [Norma ISO 11819-2: 2000].

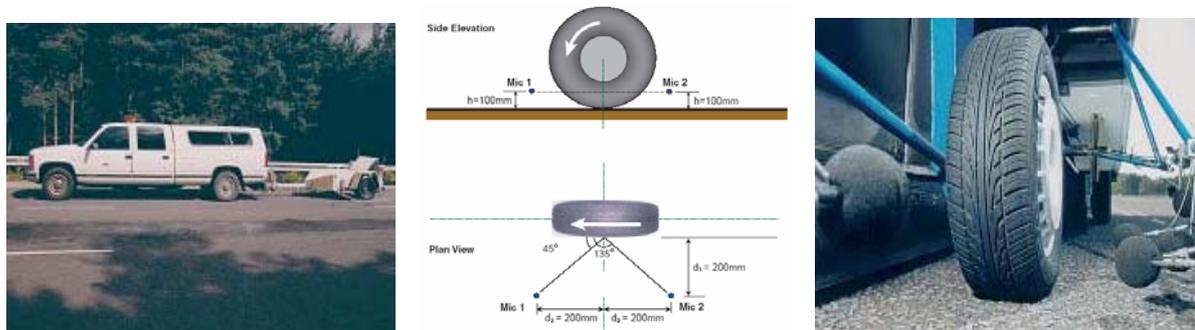


Figura 2.24 – Método da estrada proximidade (CPX) [Chandler et al., 2003]

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.

c) Método da passagem controlada (CPB) / Caracterização do tráfego condicionado

Este método é executado de acordo com a Norma NF S31-119-2: 2000: “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 2 veículos ligeiros e 4 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 (Figura 2.25). 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].

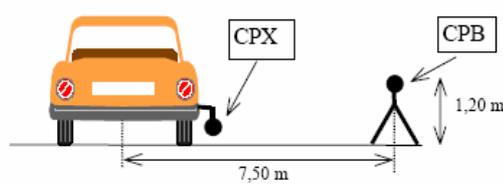


Figura 2.25 – Método da passagem controlada (CPB) vs. estrita proximidade (CPX)
[Anfonso-Lédée, 2006]

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.

d) Método Coast-By / Caracterização de motor desligado

Este método poderá ser executado de acordo com a Norma ISO 13325:2003, sendo também especificado na Directiva n.º 2001/43/CE.

A Directiva Europeia n.º 2001/43/CE foi transposta em Portugal para o Decreto-Lei n.º 72-C/2003, de 14 de Abril de 2003. Este método permite medir o ruído proveniente do contacto dos pneus com o pavimento e baseia-se nos mesmos princípios do método de passagem, neste caso, a passagem do veículo de ensaio junto ao ponto de medição ocorre com o motor desligado e em ponto morto, o que faz prevalecer o ruído pneu/pavimento (Figura 2.26). Em cada medição é controlada a velocidade do veículo, a temperatura do ar, a temperatura do pavimento e a velocidade do vento [Decreto-Lei n.º 72-C/2003].



Figura 2.26 – Método Coast-By (CB)

As principais vantagens deste método são:

- O motor desligado e o ponto morto permitem saber a exacta influência do pavimento no ruído do rolamento;
- A utilização dos mesmos veículos de ensaio diminui a incerteza na determinação da eficácia do pavimento;
- É necessário um menor número de medições.

Por sua vez tem como desvantagens:

- Os veículos de ensaio podem não ser representativos do tráfego normal da via;
- Não é conhecida a influência do pavimento no ruído geral da passagem do veículo com o motor ligado;
- Este teste exige condicionamento do tráfego normal da via ou medições apenas em certas horas do dia.

e) Método da superfície estendida

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 (Figura 2.27) [Norma ISO 13472-1: 2002].

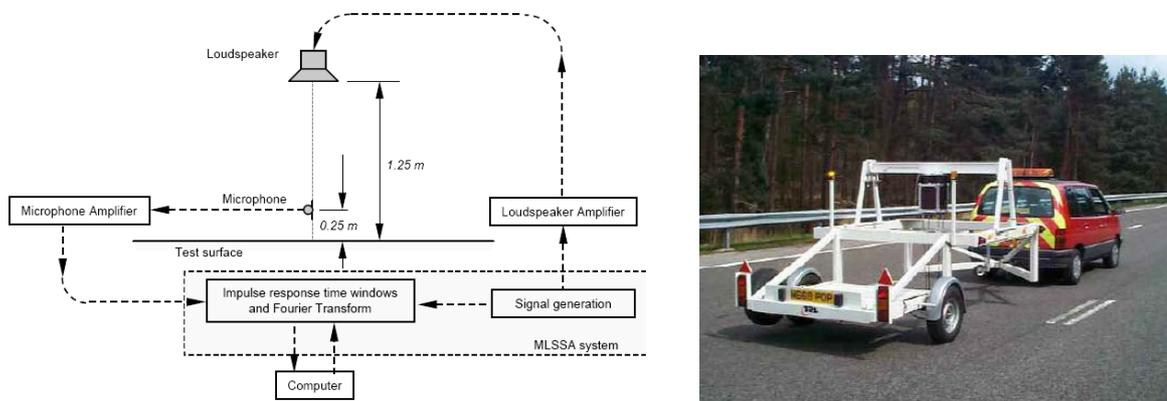


Figura 2.27 – Método da absorção sonora [Morgan, 2006]

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.

f) Método do reboque Coast-By (TCB)

Este método é especificado na norma ISO 13325: 2003, Anexo B, e é designado simplesmente por Método do Reboque.

Este método é um híbrido do método Coast-By (CB) e do método da estrada proximidade (CPX), combinando as vantagens e desvantagens de ambos. Baseia-se na escolha de dois pneus de ensaio que serão colocados num reboque sem qualquer caixa de protecção. Este reboque deverá ter um comprimento de 5 m e uma distância entre pneus de 2,5 m e deverá ser deslocado por um carro potente ou um camião (Figura 2.28). O reboque pode ser usado para avaliar o ruído emitido pela interacção pneu/pavimento em diferentes superfícies, no entanto é necessário proceder a medições distintas – veículo sem o reboque e veículo com o reboque com diferentes pneus [Norma ISO 13325: 2003].

O método TCB tem como vantagem combinar o melhor dos métodos Coast-By (CB) e estrada proximidade (CPX) e como desvantagens, a necessidade de um equipamento especial de medida e o condicionamento do tráfego.

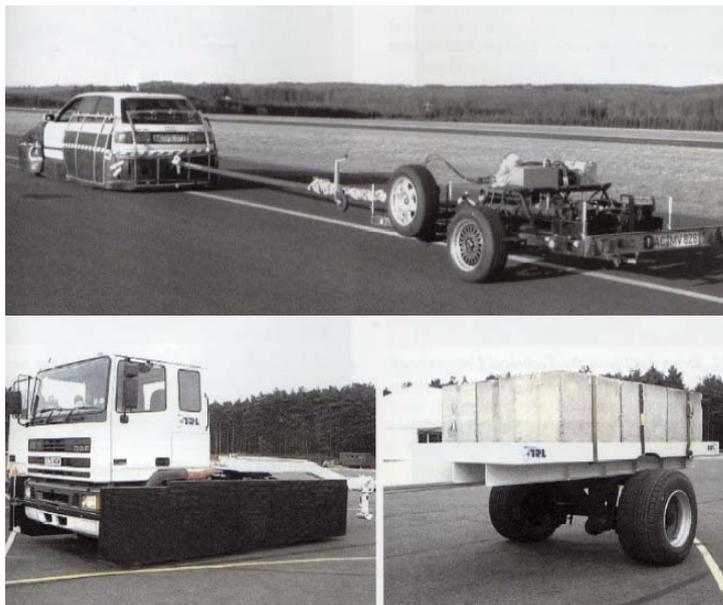


Figura 2.28 – Método TCB (Trailer Coast-By) [Sandberg and Ejsmont, 2002]

g) Método do tambor (Drum - DR)

Este método é executado em laboratório e baseia-se na utilização de um tambor de aço com diâmetro de 1,5 ou 2,5 m. O pneu de ensaio é colocado em circulação dentro e fora do tambor, com microfones próximos. O tambor deverá estar equipado com uma réplica da superfície do pavimento. Regista-se o nível médio de ruído (Figura 2.29).

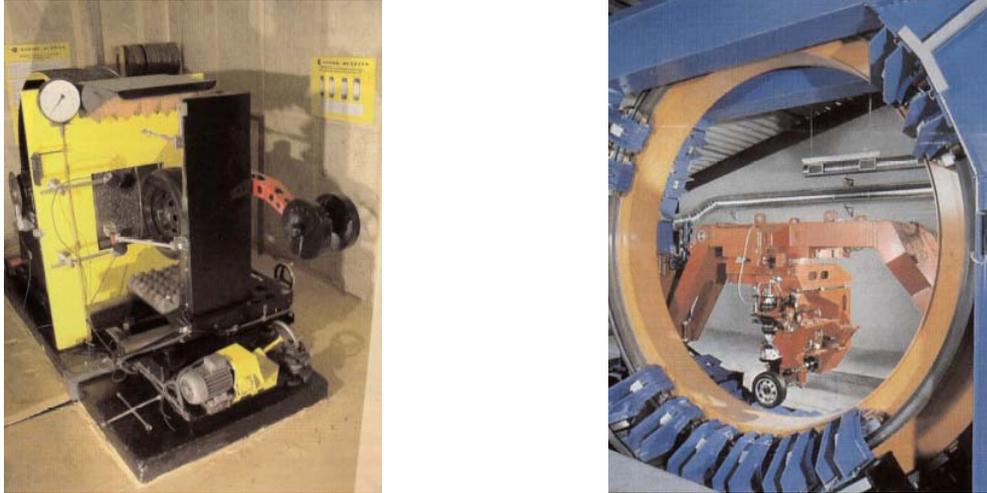


Figura 2.29 – Método do tambor [Sandberg and Ejsmont, 2002]

As principais vantagens deste método são:

- Condições estritamente controladas;
- Muito adequado para testes de pneus;
- Excelentes capacidades de repetição e reprodução;
- Requer apenas um pneu.

Por sua vez, tem como desvantagens:

- É necessário equipamento especial de medida;
- Requer réplicas de superfícies de estrada;
- Não é útil em condições de estrada molhada;
- Menos representativo que os outros métodos.

3 FACTORES QUE INFLUENCIAM O RUÍDO

Os factores que afectam o ruído associado ao tráfego de estrada podem ser divididos em quatro grupos:

- Veículos (carros, camiões, motos);
- Superfície da estrada;
- Clima;
- Comportamento de condução.

Dentro dos veículos, os factores responsáveis pela emissão de ruído são o tipo de veículo (peso, dimensões, n.º de eixos, potencia do motor), a velocidade de circulação, o tipo de pneu e o comportamento de condução, sendo que para o grupo da superfície da estrada os factores que mais intervêm são as respectivas propriedades físicas (dimensão do agregado, % betume, porosidade, textura), a idade e a rigidez.

Todos estes factores estão interrelacionados e exercem impactes quer sobre os níveis gerais de ruído, quer sobre as componentes da frequência do ruído.

A seguir apresenta-se para cada um dos grupos os factores que os integram, e expõe-se o modo como determinam o aumento ou a redução do nível de ruído. Além disso, tecem-se algumas considerações quanto à relação do ruído com as propriedades não acústicas das superfícies, tais como o atrito e a durabilidade.

3.1 Veículos

O ruído produzido pelos veículos pode ser influenciado pelo tipo de veículo, pneu e a respectiva velocidade de circulação.

O ruído gerado pelo tipo de veículo e tipo de pneu, tem sido amplamente estudado no meio da indústria automóvel, obtendo-se actualmente uma clara redução das emissões de ruído dos veículos e dos pneus quando comparados com os níveis que se atingiam há uma ou duas décadas atrás. Convirá referir que, o ruído do motor, o ruído da interacção pneu/pavimento e o ruído aerodinâmico oferecem contributos diferentes relativamente à emissão de ruído global, a velocidades diferentes. Tanto o ruído da interacção pneu/pavimento como o do motor estão intensamente relacionados com a velocidade do veículo.

O projecto aerodinâmico dos veículos também tem sido largamente desenvolvido ao longo do tempo, devido à constante procura de novos modelos e à necessidade de dar cumprimento as exigências de consumo. Esta componente do ruído global dos veículos, associada à aerodinâmica, está relacionada com o ruído gerado devido à turbulência do vento. Isto significa que a turbulência do vento não causa um elevado ruído exterior, porém produz efeitos sobre o ruído interior [Sandberg and Ejsmont, 2002]. Na realidade, este factor

de ruído só é relevante para o ruído exterior a velocidades realmente elevadas (acima dos 120 Km/h), como por exemplo, no caso de comboios de alta velocidade. O ruído aerodinâmico, não é importante no caso de velocidades de tráfego diário de veículos [Raitanen, 2005].

Não é expectável que as novas tecnologias para veículos motorizados resolvam o problema do ruído nas próximas décadas. Nesta perspectiva, coloca-se um grande desafio ao sector rodoviário, no sentido de desenvolver e testar pavimentos que reduzam o ruído e que possam contribuir para o melhoramento da qualidade de vida da percentagem relativamente elevada de populações que se encontram expostas aos incómodos níveis de ruído rodoviário [Bendtsen and Andersen, 2005].

3.1.1 Tipo de veículo

A partir de 1970 a União Europeia passou a regulamentar os valores limite de emissão de ruído pelos veículos vendidos na Europa. Desde essa altura, até aos nossos dias, os valores limite, para aprovação de novos modelos de veículos, têm vindo a ser reduzidos entre 8 a 11 dB [Bendtsen and Andersen, 2005].

Na tentativa de corresponder aos reduzidos valores limite para o ruído, os produtores de automóveis têm vindo a diminuir o ruído emitido pelo motor. Porém, não tem sido necessário reduzir o ruído pneu/pavimento, por este não ser dominante em condições de plena aceleração [Bendtsen and Andersen, 2005].

Nos procedimentos de teste para aprovações tipo, utiliza-se um automóvel em andamento a 50 Km/h ou em terceira velocidade. Quando o veículo passa uma linha definida, o acelerador é pressionado ao máximo e 10 m depois, o ruído é aferido sob aceleração total, encontrando-se o motor sob uma carga elevada e com um elevado número de rotações/minuto. Desta forma o ruído do motor é a fonte de ruído dominante, sendo o ruído pneu/pavimento menos relevante.

Sandberg (2001) refere que nos veículos ligeiros e para todas as velocidades e mudanças (da embraiagem), excepto na primeira velocidade, o ruído da interacção pneu/pavimento predomina sobre o ruído do motor. Na prática, isto significa que a uma velocidade constante, o ruído da interacção pneu/pavimento predomina sempre, mesmo a velocidades baixas (entre 30 e 50 Km/h) e em ambientes urbanos congestionados. Em veículos pesados, o ruído do motor predomina durante qualquer aceleração entre 0-50 Km/h, mas em qualquer condução acima dos 50 Km/h, predomina o ruído pneu/pavimento [Sandberg, 2001].

Porém, Bendtsen and Andersen (2005) referem que, nos veículos ligeiros, se verifica que para velocidades acima dos 40 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 (50 – 60 Km/h) [Bendtsen and Andersen, 2005].

Na Figura 3.1 apresenta-se uma relação entre o ruído do motor e o ruído pneu/pavimento no caso de um veículo ligeiro e no caso de um veículo pesado.

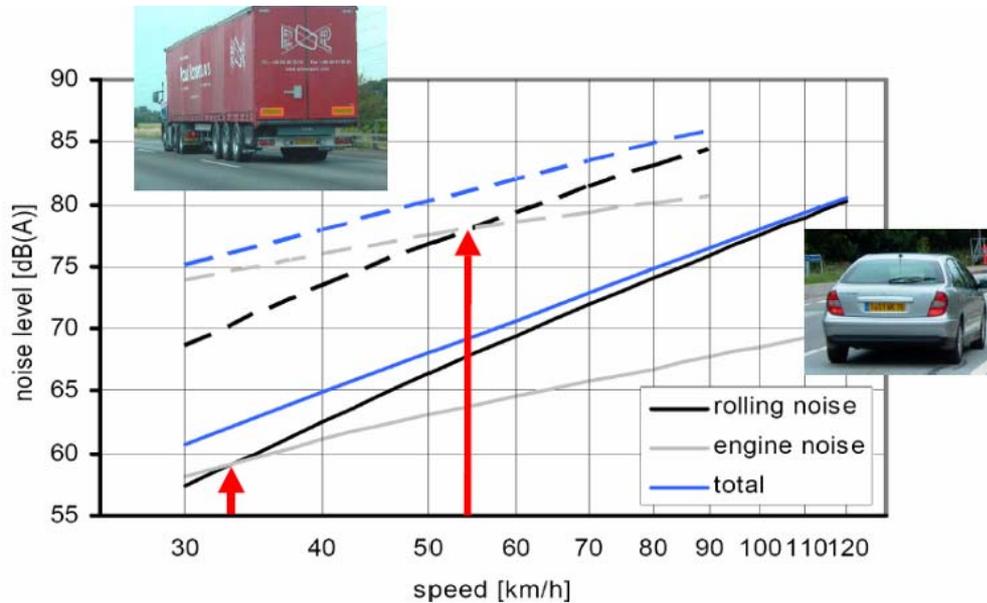


Figura 3.1 – Ruído do motor, ruído pneu/pavimento e ruído total apresentados para veículos ligeiros e pesados, em função da velocidade [Bendtsen, 2006]

A principal fonte de ruído do motor, em veículos motorizados é o sistema de exaustão devido à combustão ou explosão da mistura combustível-ar dentro dos cilindros. Esta fonte de ruído, forte e de curta duração, situa-se profundamente dentro do motor maciço e é, conseqüentemente, bastante atenuada. No entanto, alguma da energia de combustão surge como ruído, quer devido à vibração de todo o motor, quer à das peças individuais. Os ventiladores de refrigeração do motor produzem também um volume substancial de ruído [Rossing et al., 2002].

O conhecimento da influência do tipo de veículo nos níveis de ruído, permite agora considerar o tráfego real composto não só por veículos ligeiros, como também pelos mais diversos tipos de veículos pesados, em velocidade de cruzeiro e com os motores ligados. Quando estes veículos passam sobre uma transição entre duas superfícies de estrada com características muito diferentes (como por exemplo, em betão betuminoso drenante e betão de cimento transversalmente ranhurado), verifica-se que os níveis de ruído aferidos, em condições representativas, aumenta 9 dB(A) para veículos ligeiros e, em média, 5 dB(A) para veículos pesados (Figura 3.2) [Descornet, 2005].

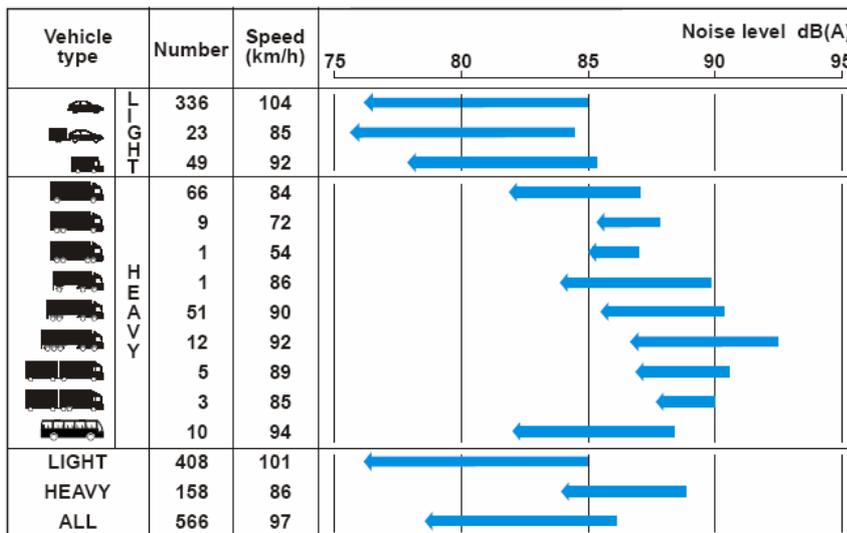


Figura 3.2 – Redução do nível de ruído com veículos de categorias diferentes numa transição entre betão de cimento transversalmente ranhurado e betão betuminoso drenante [Descornet, 2005]

Um outro estudo elaborado por LeLong (1995), registou uma diferença de 4 dB(A) em L_{Aeq} entre um betão betuminoso “standard” e um betão betuminoso drenante, para tráfego composto por veículos ligeiros e pesados, numa velocidade média de 100 Km/h e 80 Km/h, respectivamente. Através destes dados obteve-se a Figura 3.3, em que a diferença de ruído rodoviário é confrontada com a velocidade e composição do tráfego (em ordenadas é apresentada a diferença dos níveis de ruído entre uma superfície em betão de cimento e outra em betão betuminoso drenante) [Descornet, 2005].

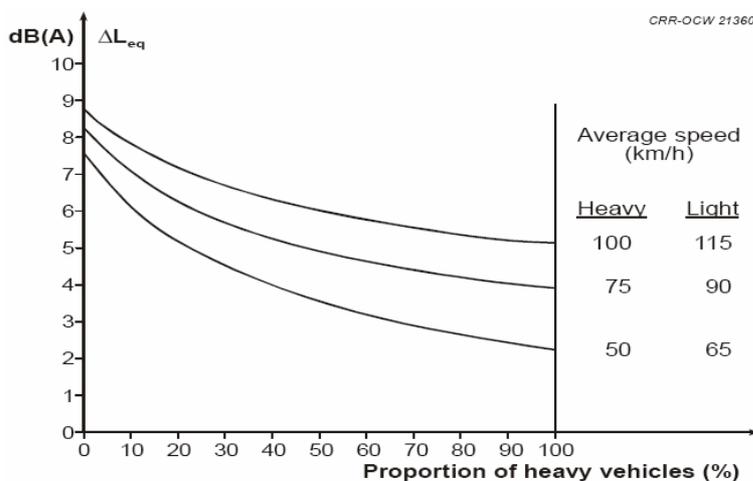


Figura 3.3 – Influência da percentagem de veículos pesados nos níveis de ruído, para diferentes velocidades [Descornet, 2005]

As previsões para 2020, tendo em conta o efeito combinado dos regulamentos da UE para o ruído do motor e para o ruído pneu/pavimento, em conjunto com o aumento do fluxo de tráfego esperado, indicam uma diminuição do nível de ruído total em áreas urbanas na ordem dos 0,6 dB e um aumento nas auto-estradas na ordem dos 0,7 dB [Bendtsen and Andersen, 2005].

3.1.2 Tipo de pneu

Num pneu, a escultura do piso e a profundidade das ranhuras afectam a geração de ruído. Embora esta variável não seja significativa, em relação à emissão geral de ruído e em comparação com a superfície do pavimento, verifica-se que a sua importância não poderá ser subestimada [Sandberg and Ejsmont, 2002].

O importante mecanismo de extracção do ar do pneu, depende essencialmente do desenho da escultura do piso e do respectivo grau de desgaste do pneu e da macro-textura do pavimento.

Em geral, um padrão de piso silencioso é o que permite que o ar escape por entre as ranhuras do piso, à medida que o mesmo entra em contacto com a superfície do pavimento. Pneus ruidosos são aqueles em que o ruído devido ao bombeamento do ar aumenta consideravelmente quando o ar não consegue escapar-se facilmente. À medida que os pneus se desgastam, o ar não pode escapar-se tão facilmente, devido à diminuição da profundidade das ranhuras do piso e, conseqüentemente, o ruído aumenta [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Nunca será demais recordar que, a segurança continua a ser a máxima prioridade no que diz respeito à concepção do pneu. O piso dos pneus deve, em primeiro lugar, remover a água sobre o pavimento molhado para permitir um bom contacto pneu/pavimento. No entanto, o desenho da escultura do piso do pneu é o que projecta a água para os lados, ou ao longo do pneu pelo que, geram mais ruído [Phillips e tal, 2003].

Os pneus mais avançados resultam em distâncias de travagem inferiores, mas suspeita-se que este factor seja responsável pelo facto dos níveis de ruído lateral, nos veículos ligeiros, ter aumentado genericamente na última década [Bowlby et al, 1995].

Num estudo elaborado para a aferição dos níveis de ruído pneu/pavimento, de um veículo em andamento a 80 Km/h, registou-se os níveis de ruído para seis tipos de pneus sobre seis tipos diferentes de superfície de estrada (Figura 3.4) [Phillips et al., 2003].

Da análise da Figura 3.4 verifica-se que o pneu PC-X foi aquele que apresentou uma maior variação, aproximadamente 9 dB(A), mas também aquele que apresentou níveis de ruído inferiores aquando da passagem na superfície ISO.

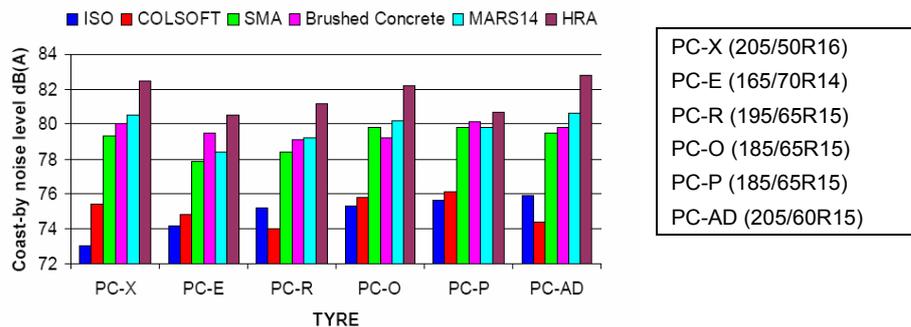


Figura 3.4 – Gamas de níveis de ruído pneu/pavimento para diferentes tipos de pneu e diferentes tipos de superfície [Phillips et al., 2003].

A geração de ruído de pneus continuará a ser uma área de investigação importante para fabricantes, dado que os regulamentos do ruído tendem a tornar-se cada vez mais exigentes. As investigações efectuadas têm vindo a demonstrar que diferentes combinações do tipo de pneu e de superfície de pavimento resultam também em diferentes níveis de ruído. Isto é, diferentes esculturas do piso do pneu, fornecem diferentes resultados, dependendo do tipo do pavimento e o pneu mais ruidoso sobre uma superfície poderá não ser sobre outra [Von Meier et al, 1990].

Novos e diversos estudos têm vindo a ser elaborados de modo a melhorar as características dos pneus. No Capítulo 6, a influência do tipo de pneu e conseqüentemente das suas características será tratada com mais detalhe, uma vez que este aspecto é geralmente desconhecido no domínio rodoviário.

3.1.3 Velocidade do veículo

O ruído do pneu/pavimento está directamente relacionado com a velocidade, facto amplamente comprovado pela extensa colectânea de dados recolhida por Rickley (1978) e reconfirmado por um outro grande estudo de Fleming (1995). Ainda neste âmbito, Sandberg (1980), demonstrou que, à medida que a velocidade aumenta, o ruído do pneu aumenta de forma não-linear.

O nível de ruído devido à interacção pneu/pavimento aumenta de forma aproximadamente logarítmica com a velocidade, o que significa que numa escala logarítmica da velocidade, os níveis de ruído aumentam linearmente com a velocidade. A energia total nas bandas de frequência tem também tendência para se deslocar para as escalas de frequência mais altas, à medida que a velocidade aumenta. As frequências mais baixas tendem a aumentar numa taxa muito mais lenta [Wayson, 1998].

Assim, não só os níveis de ruído aumentam com a velocidade, como também aumentam os componentes globais da frequência, apresentando uma tendência para frequências mais altas. A Figura 3.5 ilustra graficamente este aspecto.

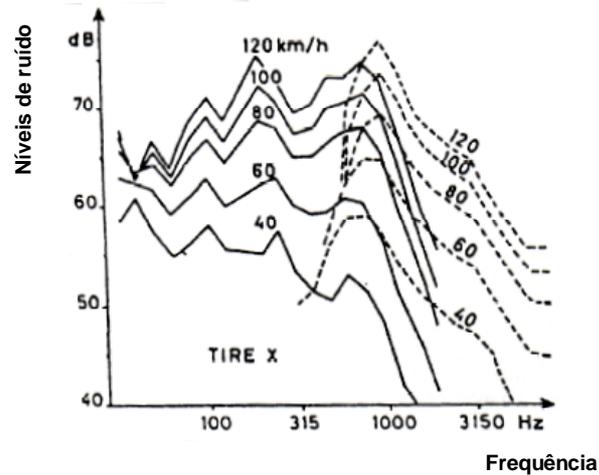


Figura 3.5 – Pneu X a diferentes velocidades, apresentando diferenciações no espectro de ruído para frequências baixas e componentes de frequências altas [Wayson, 1998]

O ruído rodoviário geral, descrito em termos de L_{Aeq} depende da velocidade do tráfego, do número de veículos em passagem durante um período considerável, da percentagem de veículos pesados e da superfície de estrada. Haberl et al. (2003) estudaram a influência da velocidade de circulação dos veículos na emissão do ruído de tráfego rodoviário através de medições efectuadas aplicando o método estatístico de passagem, em estradas com três tipos diferentes de camada superficial (betão de cimento (CC), betão betuminoso (DAC) e betão betuminoso drenante (PAC)).

Os resultados obtidos através da análise de regressão, ilustrados na Figura 3.6, demonstraram a influência da velocidade dos veículos ligeiros e pesados no ruído do tráfego rodoviário.

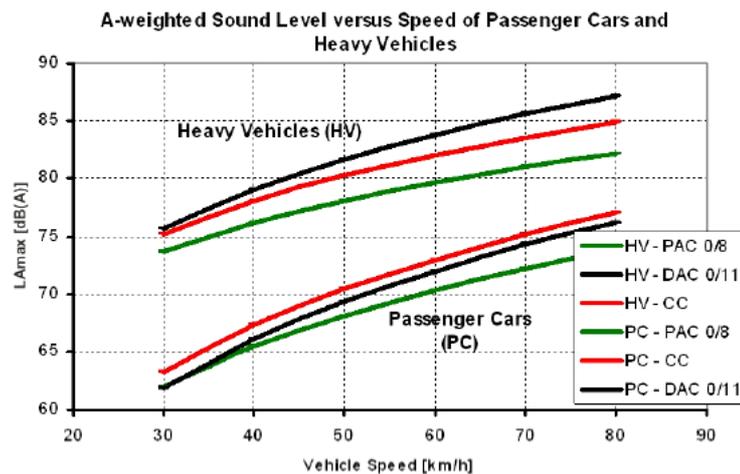


Figura 3.6 – Influência da velocidade nos níveis de pressão sonora [Haberl et al., 2005]

Da análise da Figura 3.6, verifica-se que nos veículo ligeiros (PC) uma redução de velocidade de 60 Km/h para 40 Km/h representa uma diminuição do nível de pressão sonora máxima de 5,7 dB(A) no caso do pavimento em betão de cimento (CC) e de 6,0 dB(A) e 4,9 dB(A) nos pavimentos em betão betuminoso e betão betuminoso drenante, respectivamente. Relativamente aos veículos pesados, os resultados demonstram uma diminuição do nível de

pressão sonora máxima de 4,0 dB(A), 4,8 dB(A) e 3,5 dB(A) para os pavimentos em betão de cimento, betão betuminoso e betão betuminoso drenante, respectivamente.

A redução da velocidade tem um forte efeito sobre a diminuição dos níveis de ruído. Ao medir o L_{Amax} com o método estatístico de passagem (SPB) pode-se, teoricamente, conseguir as reduções dos níveis de ruído apresentadas no Quadro 3.1 [Sandberg and Ejsmont, 2002]. Deverá notar-se que a redução do limite de velocidade não reduz automaticamente o ruído, a menos que aqueles limites sejam controlados. Por outro lado, reduzir a velocidade pode causar a redução do nível de serviço e, conseqüentemente, quebrar o livre fluxo rodoviário.

Quadro 3.1 – Reduções de ruído (L_{Amax} , método SPB) em relação à redução da velocidade [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Redução de velocidade [Km/h]	Redução de ruído [dB]
80 - 60	4,4
60 - 50	2,8
60 - 40	6,2
50 - 40	3,4
50 - 30	7,8
40 - 30	4,3

3.2 Características da superfície do pavimento

3.2.1 Propriedades físicas da camada

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. Na Figura 3.7 apresenta-se a influência da dimensão máxima dos agregados no ruído.

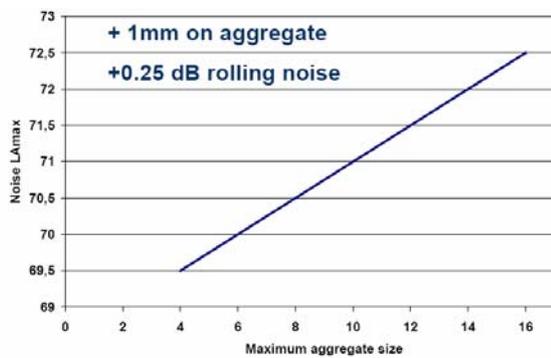


Figura 3.7 – Influência da dimensão máxima dos agregados no ruído de estrada [Bendtsen, 2006]

Assim, verifica-se que mais 1 mm na dimensão máxima do agregado implica o aumento do nível de ruído em cerca de 0,25 dB (A).

Em Portugal, nas camadas em betão betuminoso, o tamanho máximo do agregado é de 16 mm e nas camadas em betão betuminoso drenante é de 15 mm, facto que, só por si, poderá implicar uma diminuição do nível de ruído em 0,25 dB (A).

A qualidade da construção, que está sob o controlo do construtor, assume também um importante papel no que respeita à segurança e ao ruído do pneu gerado à superfície. Por exemplo, os agregados brandos não devem ser usados com os agregados duros, uma vez que a granulometria branda será desgastada mais rapidamente, deixando espaços vazios e provocando, mega e macro-texturas com características não desejadas. Este factor torna-se ainda mais negativo, porque, como se sabe, as partículas gastas preencherão também os vazios, diminuindo ao longo do tempo a porosidade do pavimento [Sandberg, 1996].

Os comprimentos de onda com textura situada na escala da macro e mega-textura (0,5 – 500 mm) são importantes quer para o controle do ruído, quer para fornecer a adequada resistência à derrapagem. Assim, é importante que a macro-textura seja cuidadosamente controlada, através da utilização de agregados de pequena dimensão, sem no entanto descuidar a necessária durabilidade da superfície. Por exemplo, superfícies com agregados de pequena dimensão têm uma baixa resistência ao desgaste provocado pelos pneus dentados (*studded tyres*). Este problema não se verifica em Portugal, visto que não são utilizados pneus dentados, comuns em países com gelo ou neve.

Para se obterem superfícies de betão de baixo ruído, torna-se necessária uma relação equilibrada entre a macro-textura e a micro-textura. Pode especificar-se a sua influência do seguinte modo:

- Em comprimentos de onda entre 10 mm e 500 mm (macro e mega-textura), o ruído aumenta significativamente à medida que a amplitude nesta escala aumenta. O mecanismo principal de ruído está relacionado com o impacto do perfil do pneu, o que tende a dar origem a ruído em frequências abaixo dos 1000 Hz. Por esse motivo, a textura deve ter a menor rugosidade possível nesta escala;
- Em comprimentos de onda entre aproximadamente 0,5 mm e 10 mm (macro-textura), o ruído em andamento diminui com a amplitude, particularmente em frequências superiores a 1000 Hz. Neste caso, a textura fornece uma ventilação melhorada da escultura do pneu, o que contribui para reduzir a geração de ruído aerodinâmico. Profundidades de textura média de 0,4 mm a 0,8 mm revelaram-se favoráveis na redução de ruído dos pneus dos automóveis e, de pelo menos 1,0 mm, para pneus de veículos pesados [FEHRL, 2006].

As propriedades de absorção de som pelos pavimentos porosos podem ser aferidas de acordo com o espectro típico do tráfego em circulação sobre cada estrada. O aumento da porosidade da superfície reduz o ruído gerado pelo bombeamento do ar, aumenta a absorção acústica e consequentemente reduz o efeito de pavilhão. Por outro lado, o

aumento da espessura da camada ou o aumento do índice de vazios tendem a reduzir as frequências onde ocorrem os principais efeitos de absorção de som [FEHRL, 2006]. Teoricamente, poderá obter-se um maior grau de aferição com o recurso a superfícies de camada dupla, por oposição às superfícies de camada única.

Um pequeno tamanho máximo de agregado em superfícies porosas é favorável à redução de ruído, enquanto que um grande tamanho máximo aumenta a durabilidade e capacidade drenante; daí a vantagem de uma superfície como o betão betuminoso drenante de camada dupla. A escolha final dependerá sempre das condições locais e das características particulares em que a superfície será usada [FEHRL, 2006].

Uma síntese útil das linhas de orientação gerais que devem ser seguidas para se obter uma superfície silenciosa de boa qualidade, são:

- Para superfícies porosas, a camada de desgaste deve ser produzida com o maior teor de vazios possível, tendo em conta a durabilidade. Um teor de vazios inicial com mais de 20% é o mínimo para se atingir uma boa redução de ruído, embora 20-30% seja preferível. A espessura de uma camada porosa deverá ser pelo menos de 40 mm, preferivelmente mais, de forma a atingir também a absorção de som a frequências relativamente baixas;
- Para superfícies porosas, é essencial produzir a porosidade, de forma a evitar obstruções, por exemplo através de “canais” bastante largos;
- A mega-textura deve ser minimizada, especialmente em comprimentos de onda de cerca de 50-100 mm, o que pode ser atingido, por exemplo, pela utilização de granulometria uniforme, não muito grande e pela sua forte compactação;
- Macro-texturas muito homogêneas/lisas (*smooth*) deverão ser evitadas. A macro-textura deve ser maximizada nas ondas de comprimento entre 2-6 mm, para pneus de veículos ligeiros, e 4-8 mm para veículos pesados;
- Os requisitos para macro e mega-textura acima referidos poderão ser obtidos mais facilmente através da utilização de uma granulometria com dimensões máximas pequenas, preferivelmente entre 3-6 mm, e com arestas pontiagudas, como acontece quando é britada [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Para seleccionar uma superfície silenciosa, terá que se considerar, não só a durabilidade da camada e as propriedades funcionais, como também o desempenho acústico da superfície. Estas propriedades incluem alterações na textura, na resistência à derrapagem, na aparência visual e nas propriedades do ligante.

Estas considerações deverão contribuir para o processo de tomada de decisão relativamente à escolha do tipo de superfície mais adequado a um determinado conjunto de condições ambientais e rodoviárias.

No entanto, uma vez que existe uma grande variedade de superfícies e que cada aplicação depende das condições ambientais e rodoviárias, assim como de requisitos acústicos específicos, não é conveniente fornecer uma orientação generalizada relativamente a

aspectos de durabilidade. Porém, os estudos da durabilidade de superfícies silenciosas, podem contribuir para a identificação de factores que devem ser considerados e ilustrar de que forma o desempenho de determinados tipos de camadas sofre alterações ao longo do tempo sob condições específicas [FEHRL, 2006].

3.2.2 Idade das camadas superficiais

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 macro-textura sofrem alterações, porque as partículas do pavimento e outros materiais sofrem desgaste;
- a mega e macro-textura, assim como a rigidez, sofrem alterações devido à compressão da estrutura da superfície pelo tráfego;
- a micro-textura 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 desintegração da superfície (perda do material fino), afectando quer a micro quer a macro textura. A chuva também representa um papel relevante na alteração da micro-textura;
- podem ocorrer fendas;
- se a superfície for porosa, os seus poros acabarão por ficar obstruídos pela acumulação de sujidade [Sandberg and Ejsmont, 2002]. 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 apresentar 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 [Franklin et al, 1979].

Em geral, considera-se que para camadas densas de textura média reduzida, os níveis de ruído aumentam durante os primeiros 1-2 anos, mantendo-se depois estáveis até vários anos mais tarde, quando começam a surgir a macro-textura, as fendas e os desnivelamentos. Nas superfícies porosas, os vazios ficam obstruídos pela sujidade, minorando por vezes as propriedades de redução de ruído muito rapidamente, e por vezes mais lentamente [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Estes resultados salientam a importância da avaliação do desempenho acústico não só na fase inicial, como também ao longo de todo o período de vida da superfície. As Figuras 3.8 a 3.11 apresentam exemplos da forma como o desempenho acústico de diferentes superfícies varia ao longo do tempo, com base em dados de algumas superfícies [FEHRL, 2006].

Na Figura 3.8 comparam-se os resultados relativos a pavimentos em betão betuminoso drenante e em betão betuminoso drenante de camada dupla. Pode observar-se que, para cada uma das superfícies examinadas, há um aumento gradual nos níveis de ruído ao longo do período de 5 anos de medições, sendo que os maiores aumentos se registam nas superfícies em betuminoso drenante de camada dupla.

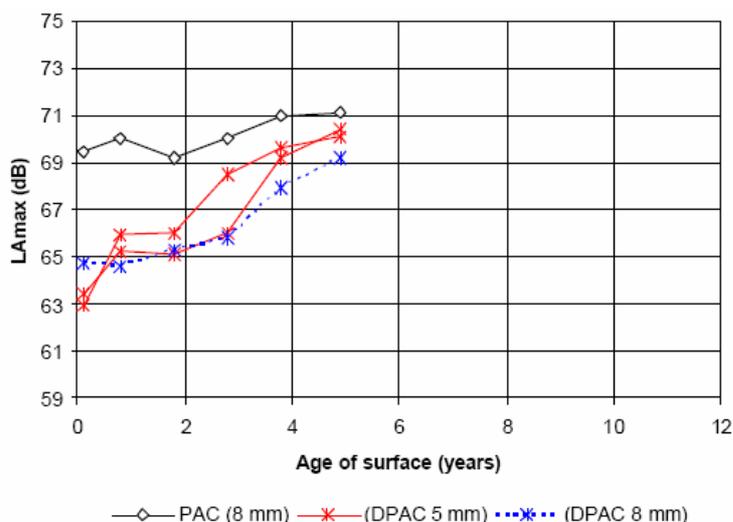


Figura 3.8 – Desempenho acústico ao longo do tempo para veículos ligeiros a uma velocidade de referência de 50 Km/h [FEHRL, 2006]

Na Figura 3.9, são comparados os resultados de uma variedade de superfícies silenciosas com alguns exemplares de superfícies convencionais (*Hot Rolled Asphalt (HRA)* e *Brushed Cement Concrete (BCC)*). Mais uma vez, verifica-se que a maior parte das superfícies regista um aumento gradual do ruído ao longo do tempo. Registam-se também aumentos do ruído ao longo do tempo nas superfícies HRA e BCC, o que indica que o desempenho acústico de algumas superfícies convencionais pode ficar igualmente reduzido ao longo do tempo.

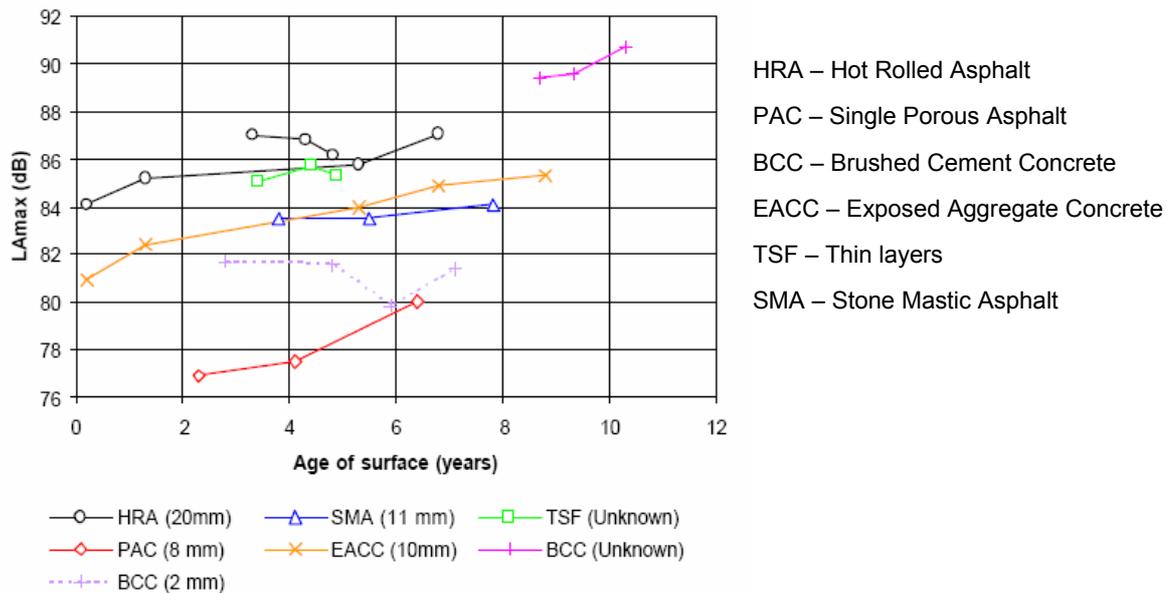


Figura 3.9 – Desempenho acústico ao longo do tempo com veículos ligeiros a uma velocidade de referência de 110 Km/h [FEHRL, 2006]

Os resultados para veículos de peso médio e pesados são apresentados nas Figuras 3.10 e 3.11, a velocidades de 85 Km/h. Em ambos os casos regista-se, para alguns tipos de superfície, um aumento gradual dos níveis de ruído ao longo do tempo. Naturalmente, as tendências não são tão claramente visíveis como no caso dos veículos ligeiros, o que pode ser atribuído quer à reduzida dependência do ruído dos veículos pesados em relação ao tipo de superfície, quer aos relativamente curtos períodos em que foi possível obter dados de ruído para algumas das superfícies.

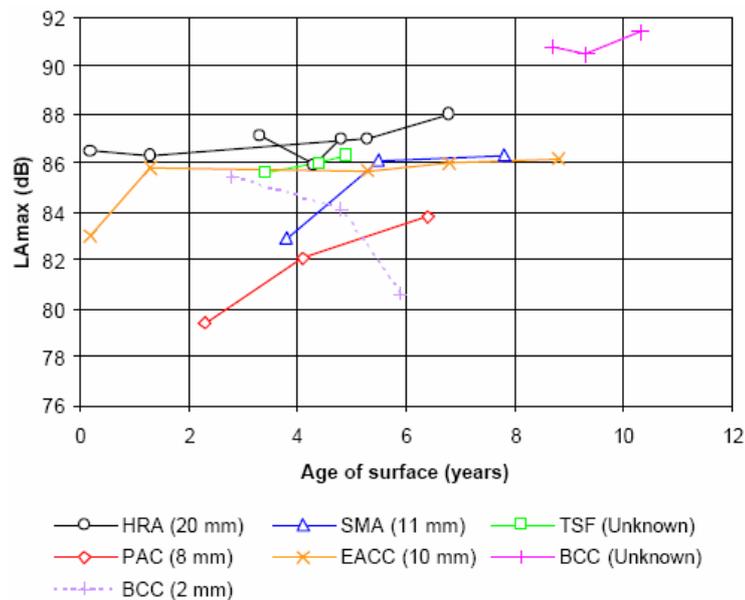


Figura 3.10 – Desempenho acústico ao longo do tempo para veículos de peso médio a uma velocidade de referência de 85 Km/h [FEHRL, 2006]

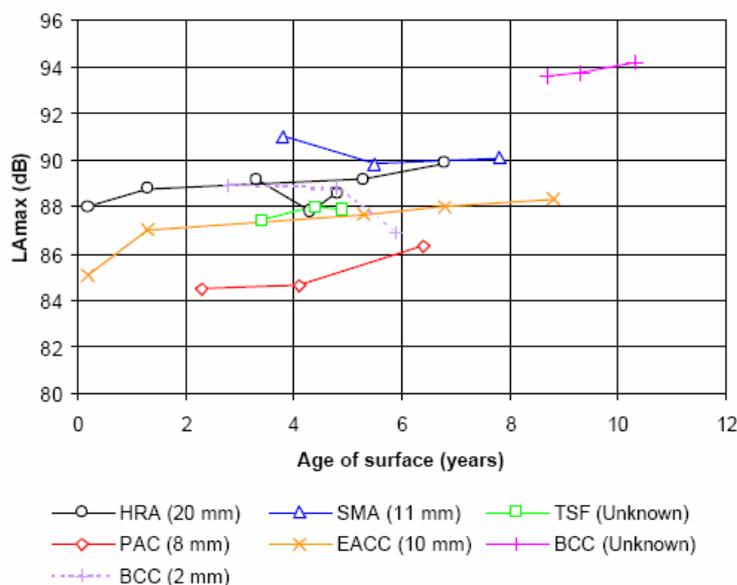


Figura 3.11 – Desempenho acústico ao longo do tempo para veículos pesados a uma velocidade de referência de 85 Km/h [FEHRL, 2006]

Um outro estudo efectuado na Dinamarca observou que a porosidade sofre menos obstrução no trilho dos pneus e que a redução de ruído persiste durante mais tempo nesta zona [Bendtsen, 1998]. As superfícies porosas parecem ter um mecanismo de auto-limpeza. Quanto maior o fluxo de tráfego e a velocidade, melhor é a auto-limpeza. Deve no entanto ter-se em conta que este estudo foi efectuado num ambiente em que os pneus dentados não são utilizados, caso idêntico ao de Portugal.

Também foi estudada a redução de ruído a longo prazo comparando diferentes superfícies porosas (diversos índice de vazios) com uma superfície de referência em betão betuminoso. Não se efectuou qualquer limpeza às superfícies durante o período do ensaio – 8 anos – e as medições foram efectuadas de forma muito similar ao método estatístico de passagem (SPB) [Raaberg et al., 2001].

Neste estudo verificou-se que:

- Os trechos em pavimento drenante eram menos ruidosos do que a secção de referência (aplicada na estrada ao mesmo tempo), durante os primeiros seis anos;
- A superfície em betão betuminoso de referência tornou-se cada vez mais ruidosa durante todo o período de teste.

3.2.3 Rigidez

A relação entre a impedância mecânica da camada superficial de um pavimento rodoviário, vulgarmente designada por rigidez, e o ruído tem vindo a ser objecto de estudo, embora os resultados obtidos não sejam muito esclarecedores.

Observou-se entretanto que quanto mais rígida é a superfície mais ruidosa se torna. Houari (2004) confirma que o nível de ruído sobre uma superfície rígida (por exemplo, em betão de cimento) é superior ao nível de ruído das superfícies flexíveis (em betão betuminoso). A rigidez do pavimento influencia significativamente a sua resposta dinâmica. Porém, influencia pouco a resposta do pneu, levando a que o efeito global da rigidez no ruído seja muito limitado [Houari, 2004].

Por sua vez, as conclusões relativamente às superfícies em misturas betuminosas com borracha reciclada (dos pneus) são ambíguas. Por um lado, não se registou que ligantes com pó de borracha apresentassem um nível de ruído mais baixo devido a uma reduzida rigidez [Hamet et al., 2000]. Por outro lado, o projecto SILVIA (SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control) demonstrou que a rigidez de uma camada superficial influencia positivamente o ruído pneu/pavimento quando o material que a constitui tem uma rigidez comparável à do pneu [Descornet et al., 2006].

Ainda neste âmbito, Biligiri (2006) mostra que parte da redução do ruído observada em laboratório pode ser explicada através das propriedades viscoelásticas das misturas, nomeadamente o ângulo de fase. Deve-se recordar que, em termos estruturais, as misturas betuminosas são caracterizadas pelo seu módulo de deformabilidade e ângulo de fase.

Na Figura 3.12 apresenta-se a relação entre a intensidade do som medida pelo método CPX (apresentado no capítulo 2.9.2) e o ângulo de fase previsto a partir de ensaios de módulo dinâmico de 4 tipos de misturas [Biligiri, 2006]. Os valores apresentados para cada tipo de mistura são valores médios.

O elevado coeficiente de correlação linear indica que o ângulo de fase pode ser utilizado como um factor determinante do ruído potencial entre misturas densas convencionais e misturas com borracha abertas ou descontínuas [Biligiri, 2006].

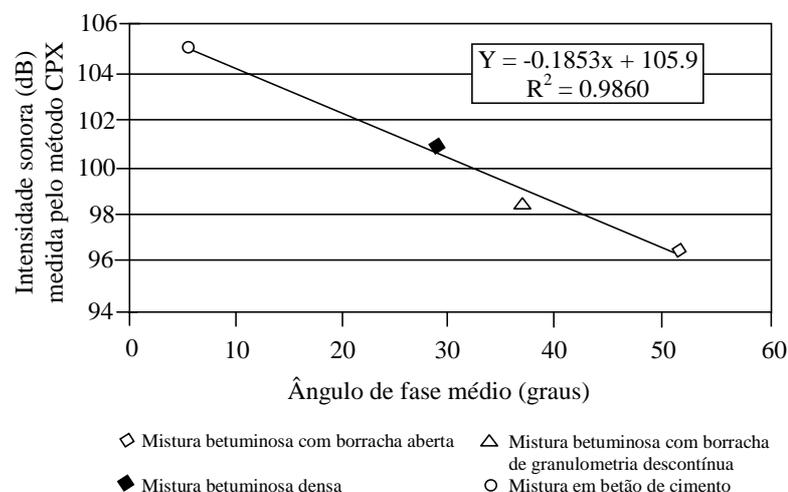


Figura 3.12 – Relação entre a intensidade do som medida pelo método CPX e o ângulo de fase médio medido no ensaio de módulo dinâmico [Biligiri, 2006]

3.3 Condições climatéricas

As variáveis meteorológicas, tais como a temperatura, a velocidade do vento, e a direcção do vento, são factores relevantes para a propagação do ruído gerado pelo tráfego rodoviário. Os perfis da velocidade do vento e da temperatura podem causar a refacção da onda de propagação do ruído provocando um efeito significativo sobre os níveis de ruído até distâncias superiores a 100 m da fonte de ruído [Kiely, 1999].

A temperatura ambiente pode também causar a refacção no trajecto do ruído, assim como afectar o pneu e a superfície da estrada, pelo que o nível de ruído pode ser consequência de uma complexa combinação de todas estas variáveis [Wayson, 1998].

Além destas variáveis, outras como a chuva e a neve também podem afectar as camadas superficiais dos pavimentos e assim influenciar os níveis de ruído no tráfego rodoviário.

3.3.1 Temperatura e vento

Embora as avaliações de ruído ambiental omitam com frequência os efeitos do vento e da temperatura devido a sua variabilidade, a relação entre a temperatura e o ruído tem vindo a ser objecto de estudos cada vez mais frequentes, já que o ruído pneu/pavimento é afectado por estes factores quer durante a emissão do som, quer durante a sua propagação.

A influência da temperatura sobre o nível de ruído depende das características do pneu e da superfície do pavimento. Desta forma, é provável que esta seja diferente para cada tipo de superfície (apesar de estas diferenças não serem muito grandes na maioria dos casos) [Raitanen, 2005].

Durante o dia, as temperaturas da superfície do pavimento podem tornar-se muito elevadas, o que produz uma camada de ar muito quente próxima da superfície e um elevado gradiente de temperatura. Nestas condições, a refacção é ascendente, resultando numa “mancha sonora” onde os níveis de ruído são significativamente reduzidos (Figura 3.13 (a)). Este fenómeno pode frequentemente levar a níveis de ruído reduzidos sobre receptores posicionados ao lado da estrada [Philips et al., 1998].

Pelo contrário, à noite o calor é irradiado longe da superfície do solo resultando numa camada de ar relativamente fria próximo do solo com camadas aquecidas por cima (inversão da temperatura). Nestas condições as ondas sonoras são refractadas para baixo o que facilita a propagação do som (Figura 3.13 (b)).



Figura 3.13 – Refracção da onda sonora devido ao gradiente da temperatura [Watts, 2005]

O vento produz um efeito similar, função da localização da fonte de ruído. Quando a fonte de ruído está contra o vento (ou quando a temperatura diminuiu) as ondas sonoras se refractem desde o solo provocando uma diminuição nos níveis de ruído. O contrário, se passa quando a fonte de ruído está no sentido do vento ou quando há uma inversão da temperatura junto ao solo (Figura 3.14).

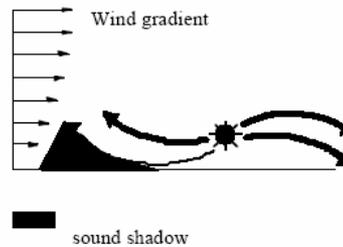


Figura 3.14 – Refracção da onda sonora devido ao radiante do vento [Watts, 2005]

Os níveis sonoros podem ser corrigidos com base em diferentes factores associados à temperatura. Os mais usados são:

- Temperatura do pneu;
- Temperatura da superfície do pavimento;
- Temperatura do ar.

Kuijpers (2001) realizou um estudo de modo a avaliar a relação entre essas temperaturas. Na Figura 3.15 (a) e (b) são ilustrados os gráficos que relacionam a temperatura do pavimento com a temperatura do ar e a temperatura do pneu, respectivamente.

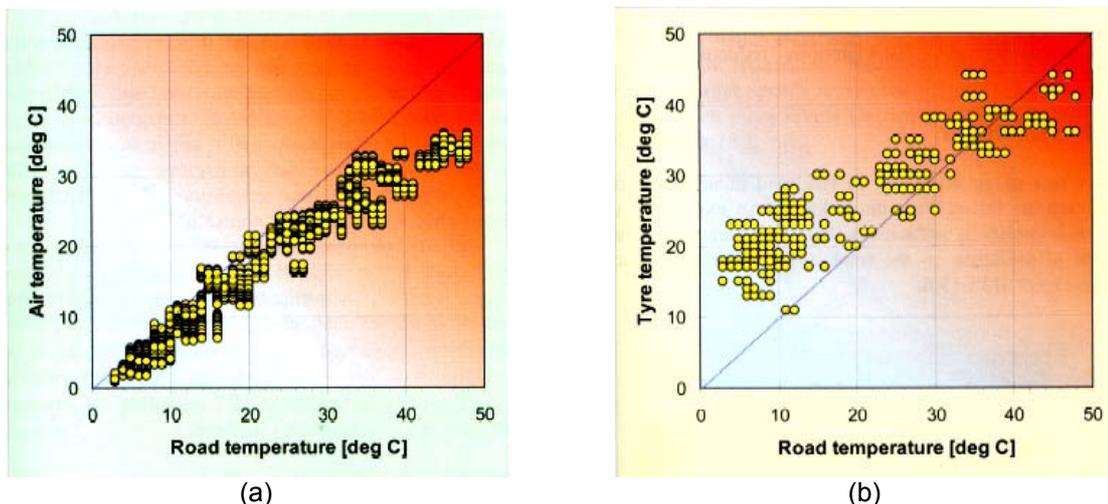


Figura 3.15 – Relação entre a temperatura da estrada e a temperatura do ar (a) e entre a temperatura da estrada e a temperatura do pneu (b) [Sandberg and Ejsmont, 2002]

A linha oblíqua indicada nas figuras mostra uma relação aproximadamente de 1:1. No entanto, a correlação entre a temperatura da superfície do pavimento e a temperatura do ar é mais elevada, pelo que geralmente opta-se pela correcção dos níveis sonoros em função da temperatura do pavimento ou do ar.

Isto significa que se deverá seleccionar ou a temperatura da estrada ou a temperatura do ar, o que poderá constituir uma escolha de ordem meramente prática. O coeficiente de correcção é, de qualquer forma, mais elevado para a temperatura do ar do que para a temperatura do pavimento, sendo a última cerca de 65% da primeira, devido ao facto da temperatura do ar não variar a uma escala tão elevada como a temperatura do pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Num estudo realizado por Afonso-Lédée (2001) é demonstrado o efeito da temperatura nos níveis de ruído e são apresentados numa forma genérica coeficientes de correcção para a temperatura para vários tipos de superfície, Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Coeficientes de correcção da temperatura para diferentes tipos de camadas superficiais [Sandberg and Ejsmont, 2002]

	Surface dressing	Fine surface dressing	Dense asphalt concrete	Very thin asphalt concrete	Porous asphalt concrete	Porous cement concrete	Dense cement concrete
Using tyre temperature	-0.124	-0.094	-0.082	-0.056	-0.060	-0.030	-0.031
Using road temperature	-0.064	-0.055	-0.057	-0.036	-0.044	-0.022	-0.012
Using air temperature	-0.119	-0.096	-0.098	-0.063	-0.060	-0.034	-0.030

Quando se fala em coeficientes de correcção para a temperatura, é assumido que se fala numa relação que pode ser descrita pela Equação 3.1:

Equação 3.1:

$$L = a + bT$$

em que:

L é nível de pressão sonora (dB);

T é a temperatura (°C);

a e b são constantes.

A inclinação b é designada por coeficiente da temperatura. O sinal negativo constantes nos valores do Quadro 3.2 significa um decréscimo dos níveis de ruído com o aumento da temperatura [Sandberg and Ejsmont, 2002].

A Norma ISO para o método estatístico de passagem (SPB) e a minuta de norma para o método da estrada proximidade (CPX) não fornecem qualquer fórmula para correcções de temperatura. No método estatístico de passagem, sugere-se apenas que a menos que as medições visem especificamente determinar a influência do tempo ou de outras condições ambientais sobre a emissão de ruído, a temperatura do ar deverá situar-se entre os 5 °C e os 30 °C e a temperatura da superfície de estrada deverá situar-se entre os 5 °C e os 50 °C.

A temperatura do pneu não é muito usada na correcção dos níveis sonoros, com excepção da Directiva da U.E. sobre o ruído do pneu (n.º 2001/43/EC ou Decreto-Lei n.º 72-C/2003

em Portugal), onde são aplicados coeficientes de correcção em função da classe do pneu e da temperatura da superfície do pavimento. Na Figura 3.16 é apresentada a curva ruído-temperatura usada pela União Europeia na Directiva n.º 2001/43/EC para o ruído do pneu [Sandberg and Ejsmont, 2002].

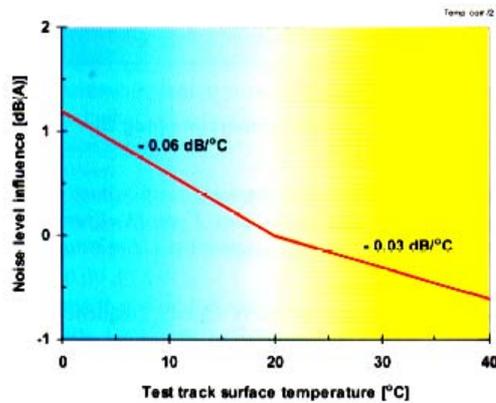


Figura 3.16 – Curva ruído-temperatura [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Num estudo elaborado por Landsberger (2001) foram apresentados os níveis de pressão sonora versus a temperatura do ar, obtidos através do método Coast-By (Decreto-Lei n.º 72-C/2003) para 6 tipos de pneus circulando a 53 Km/h e 80 Km/h, Figura 3.17 (a) e (b), respectivamente.

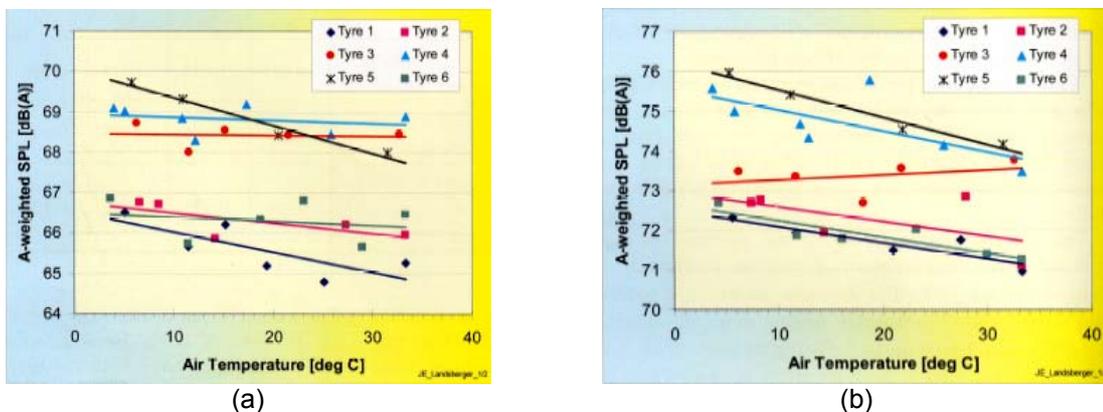


Figura 3.17 – Níveis de pressão sonora versus temperatura do ar para 6 tipos de pneus, a 53 Km/h (a) e 80 Km/h (b) [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Verificou-se que foi obtida uma pequena mas significativa redução dos níveis de ruído com o aumento da temperatura positiva, mas não para todos os pneus. Esta redução foi mais evidente em dois dos pneus (Tyre 1 e Tyre 5) a 53 Km/h e em cinco dos pneus (Tyre 1, Tyre 2, Tyre 4, Tyre 5 e Tyre 6) a 80 Km/h. A análise do espectro de frequência demonstrou também que o ruído do pneu nas frequências entre os 1200 e 2000 Hz é particularmente afectado pelas mudanças de temperatura. Contudo, as diferenças dos níveis de pressão sonora devido à velocidade e tipo de pneu são mais notórias do que devido à temperatura [Landsberger, 2001].

3.3.2 Água

A maioria das investigações e medições de ruído são efectuadas sobre superfícies secas. No entanto, já se fizeram alguns estudos que indicam que a presença da água na superfície dos pavimentos influencia os níveis de ruído. A água que fica entre o pneu e a estrada causa “aquaplaning” a altas velocidades e o ar aprisionado no mesmo espaço provoca ruído aquando da sua libertação, comprometendo a segurança dos utentes das estradas e a qualidade ambiental da sua envolvente [DMRB-HD 36/99, 1999].

As superfícies de pavimento porosas, executadas com materiais betuminosos, foram inicialmente desenvolvidas para reduzir a projecção de água causada pela passagem de veículos, assim como a formação de lençóis de água em estradas de alta velocidade, durante os períodos de chuva forte. Porém, para além da supressão do efeito de projecção de água e redução dos lençóis de água, descobriu-se que este tipo de superfície oferecia também vantagens no que respeita à redução dos níveis de ruído gerados pela circulação automóvel [Chandler et al., 2003].

Tanto numa superfície molhada, como numa superfície seca, os mecanismos de geração do ruído são basicamente os mesmos, no entanto, em presença de água, o ruído produzido pela aceleração das gotículas de água reveste-se de alguma importância [Wayson, 1998].

Os mecanismos de geração do ruído em condições molhadas podem ser caracterizados da seguinte forma:

- Compressão da água nas ranhuras dos pneus e consequente projecção;
- Deslocamento da água na frente da zona de contacto (projecção de água);
- Contacto entre a água projectada e o corpo do veículo;
- Quebra de ligação entre a borracha dos pneus e a água;
- Impacto do relevo dos pneus na superfície da água.

Num estudo realizado por Phillips e Abbott (2001), verificou-se que os níveis de ruído do pavimento drenante (PAC), molhado, aumentavam em cerca de 3,5 dB(A), relativamente aos níveis registados em tempo seco. Não foi, no entanto, observado qualquer aumento dos níveis de ruído devido à pluviosidade em superfícies convencionais, tais como a camada em *Hot Rolled Asphalt* (HRA). Considerou-se que isto era fruto do efeito combinado do preenchimento dos poros do pavimento com água, com a redução do efeito da água sobre a superfície (*splash/spray* e *aquaplaning*) que ocorrem nas superfícies porosas e que fazem com que os condutores reduzam menos a velocidade do que fariam numa superfície em betão betuminoso [Phillips e Abbott, 2001].

Quando a superfície é porosa, a água da chuva pode ser drenada livremente, de forma a impedir a formação de uma película contínua à superfície. No entanto, devido à obstrução dos poros pela água, verifica-se que as superfícies porosas levam mais tempo a retomar o

desempenho acústico normal após um período de chuva do que as superfícies densas, devido à diferença dos mecanismos de secagem (a passagem dos pneus dos veículos, no caso das superfícies densas e a evaporação no caso das superfícies porosas) [FEHRL, 2006].

Uma estimativa dos efeitos da água na superfície sobre os níveis de pressão sonora são apresentados no Quadro 3.3, sendo que os valores indicados são incrementos relativamente à superfície seca. Porém, nesta estimativa não existe uma quantificação da água na estrada como por exemplo, altura de água e/ou intensidade de precipitação [Sandberg and Ejsmont, 2002].

O efeito da água numa superfície betuminosa densa é apresentado na Figura 3.18. Neste caso, as medições foram efectuadas aplicando o método estatístico de passagem (SPB) e com a uma rega artificial sobre a superfície, com recurso a um tanque de água. A quantidade de água foi moderada, representativa de uma chuva de intensidade média na Suécia (provavelmente considerada de baixa intensidade num clima mais quente).

Quadro 3.3 – Estimativa do efeito da humidade na superfície de estrada sobre os níveis sonoros [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Grau de Humidade	0 – 60 Km/h	61 – 80 Km/h	81 – 130 Km/h
Seco	ref.	ref.	ref.
Humidade, devido ao degelo (usando sal) ou devido a chuviscos	+ 2 dB	+ 1 dB	0 dB
Humidade devido à chuva moderada	+ 4 dB	+ 3 dB	+ 2 dB
Humidade devido à chuva intensa	+ 6 dB	+ 4 dB	+ 3 dB

O efeito é substancial nas frequências superiores a 1000 kHz, mas para a generalidade dos níveis não é elevado. Uma característica muito típica, nos pavimentos com água, é o espectro menos variável obtido em quase todo o intervalo de frequência, com excepção da componente relativa ao ruído de exaustão para as frequências de 80 a 120 Hz.

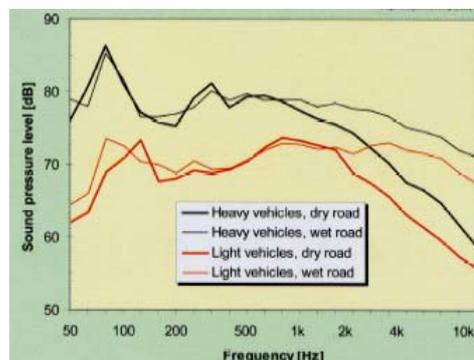


Figura 3.18 – Espectro de frequência típico de uma superfície húmida versus espectro em condições secas, sobre a mesma superfície [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Num estudo efectuado recentemente em Espanha foram analisados os níveis de ruído em três superfícies (betão betuminoso, betão betuminoso drenante e microaglomerado) para as condições seco e molhado, tendo-se obtido os gráficos apresentados na Figura 3.19 (a) e (b), respectivamente [Jiménez, 2006].

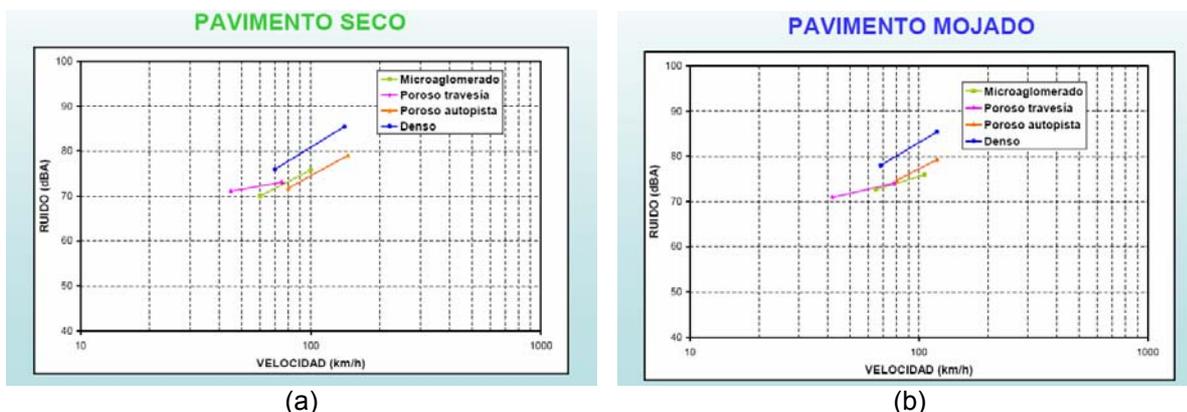


Figura 3.19 – Níveis de ruído em condições seco (a) e molhado (b) [Jiménez, 2006]

Da análise das Figura 3.19 (a) e (b), verifica-se que a amostra é constituída apenas por dois pontos, pelo que poderá ser considerada bastante reduzida. Neste estudo concluiu-se que, a superfície em betão betuminoso apresenta níveis de ruído mais elevados quando comparados com as superfícies em betão betuminoso poroso e microaglomerado, na condição seco ou molhado, na ordem dos 5 dB(A).

Verificou-se também que uma das principais dificuldades que o estudo do ruído em condições molhadas apresenta, é a contabilização da quantidade de água espalhada na superfície do pavimento. A metodologia utilizada correntemente consiste em molhar o pavimento através de um camião cisterna, pelo que é necessário desenvolver-se uma metodologia que permita este controlo, para que, em trabalhos futuros seja possível comparar-se com maior fiabilidade os resultados obtidos.

3.4 Comportamento dos condutores

O comportamento dos condutores condiciona, efectivamente, os níveis de ruído provocados pelos veículos. Mesmo no conjunto de qualquer categoria de veículos, o ruído gerado por um veículo individual é significativamente afectado pela forma como o mesmo é conduzido.

Especificamente, o ruído emitido depende da velocidade de circulação do veículo, da mudança seleccionada e da aceleração ou desaceleração. Estes factores têm uma influência variável sobre o ruído do tráfego, já que os condutores são usualmente confrontados com condições de tráfego e de estrada que podem ser muito diversas (nunca dois condutores reagirão exactamente da mesma maneira a uma dada situação, uma vez que os tipos de condução diferem substancialmente) [Phillips and Kinsey, 2001].

Num estudo elaborado pelo Politécnico de Milão (1997) refere-se que uma diminuição significativa da emissão do ruído de tráfego rodoviário poderá ser obtida pelo condutor, adoptando um comportamento adequado. Outras reduções passarão pela optimização da estrada e dos pneus (Figura 3.20).

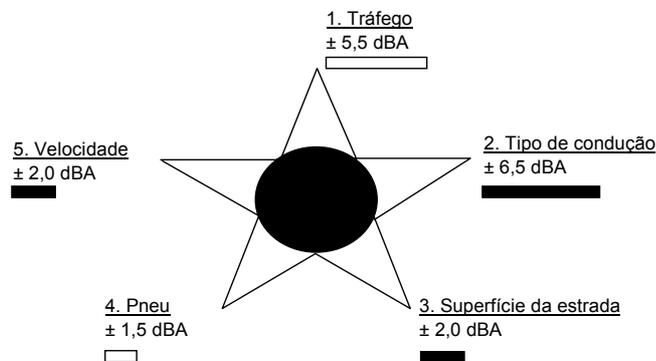


Figura 3.20 – Influência dos diferentes parâmetros no nível de ruído [Mancosu, 1999]

3.5 Propriedades não acústicas

Os parâmetros de superfície abordados anteriormente encontravam-se relacionados com as propriedades acústicas da superfície. No entanto, o desempenho global de uma superfície de estrada deve considerar outros parâmetros relacionados com a segurança, economia de combustível e benefícios de custo-duração, que não se podem pôr de parte unicamente para reduzir o ruído. Estas propriedades não acústicas da superfície dizem respeito à resistência à derrapagem e à resistência ao rolamento.

As superfícies de estrada são executadas de forma a oferecerem a adequada resistência à derrapagem, especialmente em condições de pluviosidade. Actualmente admite-se a existência de uma série de factores relativos à textura com funções significativamente diferentes na melhoria das características de resistência à derrapagem e de geração de ruído. Nas camadas densas, a micro-textura ajuda a fragmentar a película de água e a macro-textura ajuda a “armazenar” o excesso de água à superfície, melhorando o contacto entre o pneu e a superfície e evitando o efeito de “aquaplaning”. As camadas porosas fornecem vantagens adicionais contribuindo para dissipar o excesso de água à superfície, graças às suas propriedades de rápida drenagem [FEHRL, 2006].

No entanto, é possível construir superfícies de estrada que contenham quer um adequado desempenho ao nível da resistência, quer baixo nível de ruído. A solução será a de assegurar que as amplitudes da textura que contribuem para os requisitos de segurança da superfície, se situem em texturas de comprimento de onda que não aumentem os níveis de ruído pneu/pavimento e, preferencialmente, que tenham uma influência positiva sobre a redução desse ruído.

Uma camada em betão betuminoso drenante apresenta uma resistência à derrapagem inferior à de uma camada em betão betuminoso em condições de travagem a fundo e/ou

brusca. Por exemplo, verifica-se que nessas condições as distâncias de paragem podem ser 20-40% mais longas do que numa camada em betão betuminoso devido à esfoliação da camada de betume. Este problema verifica-se apenas durante os primeiros meses após abertura ao tráfego visto que, durante este período, existe uma camada espessa de betume em torno do agregado a qual se desgasta alguns meses depois [FEHRL, 2006].

A resistência ao rolamento tem um impacto significativo quer sobre a economia de combustível, quer sobre as emissões de gases no escape, especialmente CO₂. Consequentemente, foram efectuados muitos estudos, especialmente pela indústria de pneus, no sentido de reduzir a resistência ao rolamento.

Dos estudos disponíveis, verifica-se que a resistência ao rolamento dos pneus não está grandemente correlacionada com os níveis de ruído dos pneus. De facto, alguns estudos demonstraram que os pneus com baixa resistência ao rolamento também geram baixos níveis de ruído [Sandberg and Ejsmont, 2002].

4 INFLUÊNCIA DOS PAVIMENTOS

4.1 Tipos de pavimento

Um pavimento rodoviário é considerado como uma estrutura constituída por várias camadas apoiadas numa fundação. A principal função de um pavimento consiste em assegurar a existência de uma superfície de rolamento que possibilite a circulação dos veículos com comodidade e segurança, durante um determinado período de tempo, sob a acção do clima e do tráfego.

Certas características dessa superfície dependem essencialmente da constituição da camada de desgaste dos pavimentos, nomeadamente as relacionadas com a textura e cor, as qualidades antiderrapantes, as qualidades ópticas e as qualidades associadas à geração de ruído. Outras características estão, em geral, mais relacionadas com o comportamento estrutural de todo o pavimento, como a regularidade e o desempenho da superfície.

Assim, a constituição e modo de comportamento caracterizam os diferentes tipos de pavimentos. Poder-se-á, de um modo geral, estabelecer a existência em Portugal de dois tipos de pavimentos, os flexíveis e os rígidos. No entanto, dentro dos pavimentos flexíveis podem-se ainda referir os pavimentos perpétuos e os pavimentos silenciosos.

O ruído causado pelo tráfego é considerado pelas populações vizinhas às estradas uma das maiores fontes de desconforto, sobretudo em áreas urbanas, onde se situa a maioria das habitações. Desde há vários anos têm-se vindo a desenvolver consideráveis esforços no que respeita à produção de pavimentos de baixo ruído com base no incremento das propriedades relacionadas com a porosidade.

Os pavimentos silenciosos, quando aplicados adequadamente, são uma das formas mais eficazes de reduzir o ruído do tráfego rodoviário. Actualmente as superfícies de estrada mais silenciosas são as porosas ou as de textura fina. 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 [Nilsson et al., 2005].

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.

A seguir apresenta-se uma síntese dos diferentes tipos de pavimentos e estudos elaborados por diversos países e grupos de trabalho onde se estabelecem comparações ao nível de

diversos tipos de camadas superficiais, sendo que no capítulo 5 será abordada numa forma mais detalhada a textura superficial.

4.1.1 Rígidos

Um pavimento rígido é constituído por uma laje de betão de cimento, a qual é apoiada numa camada de sub-base constituída por material granular ou, no caso de tráfego intenso, estabilizado com ligante hidráulico. Neste pavimento considera-se que a laje de betão desempenha o papel de camada de desgaste e de camada de base (Figura 4.1) [Pereira e Picado-Santos, 2002].

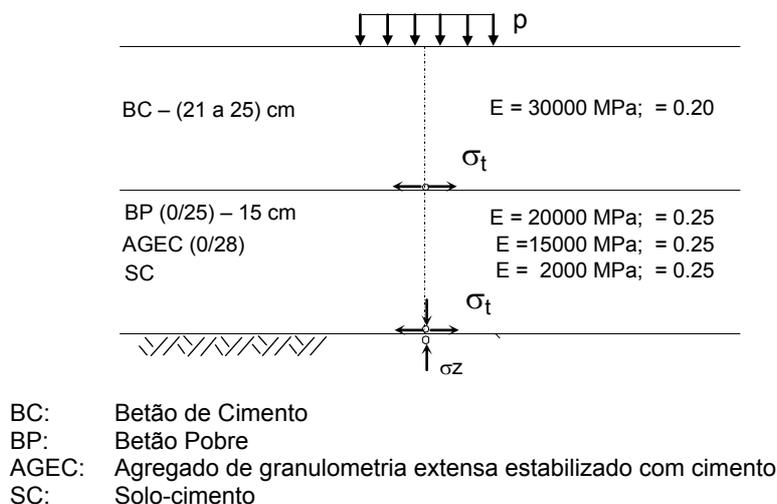


Figura 4.1 – Pavimento rígido: constituição e modo de funcionamento [Pereira e Picado-Santos, 2002]

Relativamente às características superficiais dos pavimentos rígidos, a resistência ao deslizamento obtém-se através da utilização de areia siliciosa na mistura e dando ao betão fresco uma textura superficial adequada, através da escovagem ou com a produção de ranhuras no sentido longitudinal ou transversal. Outras características superficiais a ter em conta, por razões de segurança, comodidade e economia, são as propriedades ópticas reflectoras do pavimento.

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 [Pereira e Picado-Santos, 2002].

A ranhuração transversal parece causar os maiores níveis de ruído lateral (em passagem). Parece também, que a textura da superfície da ranhuração transversal uniforme, especialmente quando espaçada a mais de 26 mm, gera os maiores níveis de ruído pneu/pavimento, bem como os tons mais irritantes. No entanto, as pesquisas efectuadas

mostraram que o espaçamento aleatório pode reduzir e mesmo eliminar o irritante tom puro gerado pela ranhuração transversal. Também se verificou que a ranhuração longitudinal reduz os níveis de ruído geral, mas à custa de uma redução do atrito da superfície, em comparação com a ranhuração transversal. Por outro lado, o atrito da superfície também diminui mais rapidamente ao longo do tempo, no caso da ranhuração longitudinal do que no caso da ranhuração transversal [Wayson, 1998].

A profundidade da textura da ranhuração transversal parece também ser relevante no que diz respeito aos níveis de ruído lateral nos pavimentos em betão de cimento. Resultados de testes Australianos mostraram que uma maior profundidade gerava uma ligeira melhoria no ruído, ao passo que as tendências reveladas pelos dados Americanos apresentam vantagens ainda maiores obtidas pelo aumento da profundidade. Outros dados obtidos nos Estados Unidos (E.E.U.U.), sugerem que outras características das superfícies, tais como o espaçamento da ranhuração ou pentes do mecanismo de ranhuração, técnicas de construção e o tamanho do agregado, devem ser também consideradas [Wayson, 1998].

4.1.2 Flexíveis

A constituição de um pavimento flexível pode ser muito diversa e depende da intensidade do tráfego, da capacidade de suporte do solo de fundação e das características dos materiais disponíveis.

Os pavimentos flexíveis são compostos por várias camadas que devem trabalhar em conjunto, cada uma delas absorvendo parte das solicitações impostas e transmitindo o restante às camadas localizadas em níveis inferiores (Figura 4.2) [Pereira e Picado-Santos, 2002].

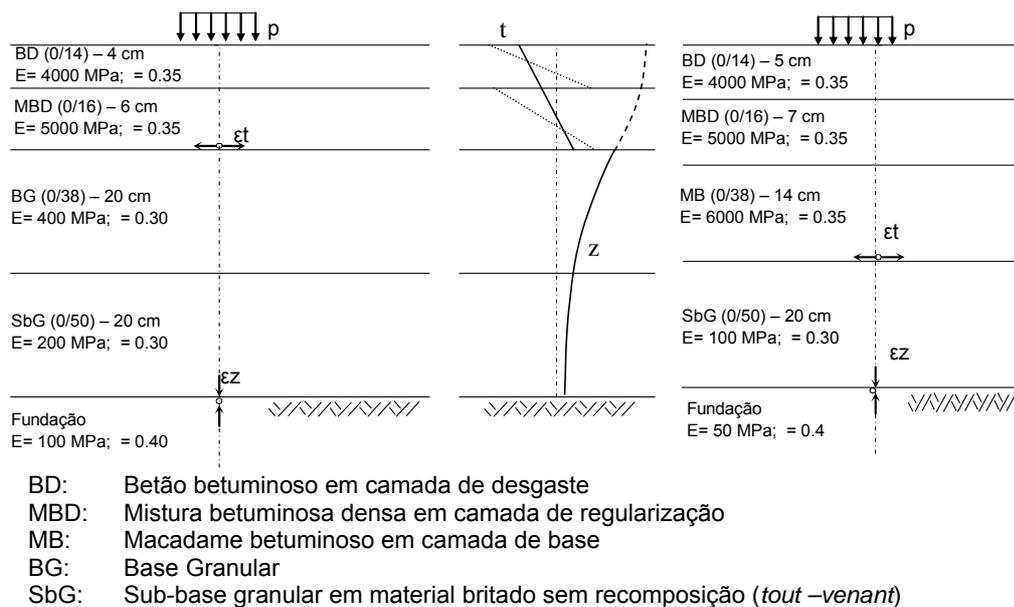


Figura 4.2 – Pavimento flexível: constituição e modo de funcionamento [Pereira e Picado-Santos, 2002]

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. Esta caracterização das camadas do pavimento encontra-se patente nos Cadernos de Encargos.

O conceito de “Pavimento Perpétuo” foi desenvolvido por Nunn (1997) para fazer face ao aumento da agressividade do tráfego. Este apresentou as suas principais características, sintetizadas na Figura 4.3 e as funções desejáveis de cada camada.



Figura 4.3 – Conceito de pavimento perpétuo

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 (Newcomb et al, 2001). 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.

A durabilidade e a estabilidade são os principais requisitos das camadas que constituem os pavimentos perpétuos. A durabilidade da camada de base poderá ser garantida limitando as tensões de tracção. A camada de regularização para além de durável também deve ser estável. A estabilidade necessária pode ser obtida através do aumento da dimensão máxima dos agregados desta camada para 37,5 mm. A camada de desgaste deve ser resistente às deformações permanentes, impermeável e resistente ao desgaste.

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 (principalmente textura e impermeabilidade), 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. 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) [Andersen et al, 2006].

4.1.3 Silenciosos

Raitanen (2005) refere que, a melhor definição de superfícies silenciosas é atribuída a Sandberg e Ejsmont (2002). Estes dizem que uma superfície é silenciosa quando ao “interagir com o pneu, influi no ruído do veículo de tal forma que produz uma redução de pelo menos 3 dB, em relação ao ruído gerado sobre um pavimento convencional”. A esta definição ter-se-ia que acrescentar “sempre que não se comprometam outras características funcionais da superfície”. A seguir apresentam-se as soluções de pavimentos mais utilizadas na redução do ruído.

Os pavimentos porosos são os mais utilizados e geralmente apresentam uma espessura compreendida entre os 3 e os 6 cm. 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 (0-700Hz), médias (700-1250 Hz) e altas (1250 - 2000 Hz) frequências são 0,2; 0,45 e 0,60 respectivamente [FEHRL, 2006].

Além do seu comportamento acústico, apresentam outras qualidades a nível de comodidade e segurança (drenagem, aderência, etc). Estes pavimentos apresentam o inconveniente da colmatação dos poros, o que origina a perda das suas principais propriedades, como a drenante e a acústica.

Perante a experiência de que um tamanho máximo de granulometria reduzido 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 acústica 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 betuminosos de borracha consistem em camadas porosas realizadas com material proveniente de pneus reciclados. A sua porosidade está entre os 20 e os 40%. Embora a sua eficácia acústica seja importante, apresentam problemas de resistência e durabilidade [FEHRL, 2006].

Os tratamentos superficiais são camadas formadas por ligante, geralmente betume asfáltico, ou ligante e agregado de pequena dimensão, com espessuras que não ultrapassam os 2 a 3 cm. Apresentam problemas de durabilidade para certos níveis de volume de tráfego. Os tratamentos só com ligantes são designados por rega. Enquanto que, os tratamentos superficiais com ligante e agregado, incluem o revestimento superficial betuminoso, o microaglomerado betuminoso a frio, e a lama asfáltica (Slurry Seal) e podem ser simples ou duplos. Os tratamentos superficiais proporcionam melhor rugosidade e diminuição do ruído.

O micro-betão betuminoso rugoso é utilizado na realização de camadas de desgaste com espessura delgada, geralmente entre 2,5 cm e 3,5 cm, podendo ser incluída no grupo dos tratamentos superficiais, já que se pode desprezar a contribuição para a resistência estrutural do pavimento. As vantagens desta camada são as boas características de regularidade oferecidas (conforto) e a excelente aderência obtida (segurança). Habitualmente, este tipo de camada é utilizado em zonas de altitude elevada, em substituição das camadas drenantes, devido à deterioração com ciclos de gelo e degelo, e redução da eficácia com o uso de agentes de degelo.

Os pavimentos 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. Os ressoadores são dispositivos que absorvem o som para as frequências baixas. Deste modo, a camada porosa absorverá as médias e as altas frequências e os ressoadores as baixas. Os coeficientes de absorção são de 0,6; 0,4 e 0,7 respectivamente. Os seus resultados acústicos obtidos em laboratório são óptimos, no entanto, o seu custo inicial é elevado (similar ao das camadas porosas). Actualmente, este tipo de pavimento encontra-se numa fase experimental [FEHRL, 2006].

Na Figura 4.4 mostra-se o aspecto de três camadas usadas para tornar os pavimentos silenciosos.

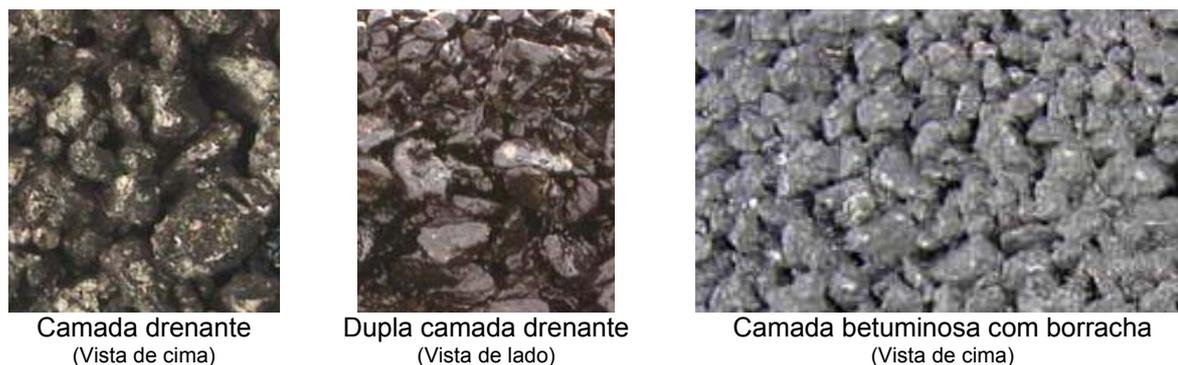


Figura 4.4 – Diversos tipos de pavimentos silenciosos

A seguir apresentam-se vários resultados obtidos em diferentes países, com o objectivo de comparar o nível de ruído em diferentes tipos de superfícies.

4.2 Camadas superficiais dos pavimentos flexíveis

Em Portugal, na realização da camada de desgaste em pavimentos flexíveis, aplica-se de um modo geral dois tipos de misturas, o betão betuminoso ou o betão betuminoso drenante. Contudo, são por vezes também aplicados alguns tratamentos superficiais, sobretudo quando se pretende reabilitar certas características funcionais do pavimento.

As misturas betuminosas são constituídas geralmente por um conjunto de materiais granulares doseados e misturados numa central com uma quantidade de ligante previamente determinada. Depois de misturados, esses materiais são transportados, espalhados e compactados, constituindo uma camada de pavimento. Em termos gerais, são exigidas às misturas betuminosas características tais como: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade.

As características físicas e mecânicas necessárias para que os agregados possam constituir camadas de pavimentos rodoviários, bem como os fusos granulométricos, estão habitualmente expressos nos Cadernos de Encargos.

A formulação ou estudo de composição de uma mistura betuminosa envolve métodos empíricos, analíticos e racionais. Os métodos empíricos são os de uso mais generalizado, incluindo-se neste grupo o Método de Marshall, mais usado em Portugal e em todo o mundo.

4.2.1 Camadas densas

As camadas em betão betuminoso (BB), são concebidas com agregados de granulometria 0/10 ou 0/14, com uma porosidade compreendida entre os 3 e 6 % e um teor em betume situado entre os 5 e 6 %.

A camada de desgaste em betão betuminoso, não possui as fortes características de durabilidade nem de atrito dos pavimentos cuja camada de desgaste é em betão de cimento. Em geral, na comparação de pavimentos com camadas de desgaste em betão betuminoso ou em betão de cimento, verifica-se que, a primeira é mais silenciosa. Quando o betão é transversalmente ranhurado, as vantagens são ainda maiores.

As considerações sobre as qualidades de redução do ruído deste tipo de camadas são extremamente importantes, visto que a maioria das medições efectuadas para a sua obtenção, recorreram a camadas densas como superfície de comparação, conforme pode constatar-se a seguir.

Num estudo publicado no âmbito do projecto SILVIA (SilendaVia – Sustainable Road Surface for Traffic Noise Control), são apresentados os valores de emissão de ruído para veículos ligeiros, para diferentes tipos de camadas de desgaste e para velocidades de 50, 80 e 110 Km/h (Quadro 4.1) [Andersen et al., 2006].

Quadro 4.1 – Emissão do ruído para diferentes tipos de camadas e para veículos a 50, 80 e 110Km/h [Andersen et al., 2006]

Cars	Number of measurements	Avg- L_pmax	min- L_pmax	Max- L_pmax	min- aggr.	max- aggr.	avg- aggr.
SMA, cars-50	6	70,6	68,6	74,1	6	12,8	8,6
TSF, cars-50	6	65,8	61,5	68,9	6	6	6,0
DAC or DACo, cars-50	22	70,4	67,9	74,1	6	16	9,6
DPAC, cars-50	18	66,7	62,9	70,4	5	8	6,0
SD, cars-50	2	74,0	72,3	75,7	8	16	12,0
CC or CCb, cars-50	2	75,6	74,0	77,2			
Paving stones, cars-50	1	79,6					
SMA, cars-80	5	78,7	76,5	82,1	10	16	12,8
DAC, cars-80	6	78,8	74,7	82,8	14	16	14,7
DPAC, cars-80	4	69,6	68,3	70,9	7	7	7,0
EACC, cars-80	2	75,6	74,5	76,8	7	7	7,0
PAC, cars-80	2	76,1	76,0	76,2	14	14	14,0
PCC, cars-80	2	74,5	74,0	74,9	7	7	7,0
TSF, cars-80	2	72,4	70,3	74,4	6	6	6,0
Slurry seal, cars-80	1	78,4					5,0
CCb, cars-110	10	84,6	79,8	90,7	2	2	2,0
DAC, cars-110	5	82,0	79,4	82,9	8	16	11,8
DPAC, cars-110	4	78,0	76,5	80,0	5	11	7,3
EACC, cars-110	6	83,9	80,9	85,8	10	10	10,0
HRA, cars-110	8	86,3	84,1	87,9	20	20	20,0
MA (guss-), cars-110	4	81,9	81,1	82,9	5	8	6,5
PAC, cars-110	4	79,1	76,9	82,0	8	16	10,0
PCC, cars-110	4	77,1	75,8	78,6	8	8	8,0
SMA, cars-110	11	82,2	78,3	86,1	8	16	10,1
TSF, cars-110	7	82,3	79,4	85,7	8	8	8,0
SD, cars-110	2	87,8	87,7	87,9			

Sendo as camadas de desgaste do tipo:

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

Esta nomenclatura será usada ao longo do texto e representa na terminologia anglo-saxónica os diferentes tipos de camadas de desgaste.

Estes resultados são ilustrados nas Figura 4.5 a Figura 4.7. Na Figura 4.5 pode-se observar que a uma velocidade de 50 Km/h os pavimentos mais silenciosos são os que possuem uma dupla camada porosa (DPAC) e uma camada delgada (TSF), com emissões de ruído cerca de 67 e 66 dB(A), respectivamente. As mais ruidosas são as de pedra, as de betão de cimento (CC) e os revestimentos superficiais (SD), com valores de 79 dB, 76 dB e 74 dB, respectivamente. A variação entre os pavimentos mais ruidosos e os mais silenciosos é de 10 dB (A).

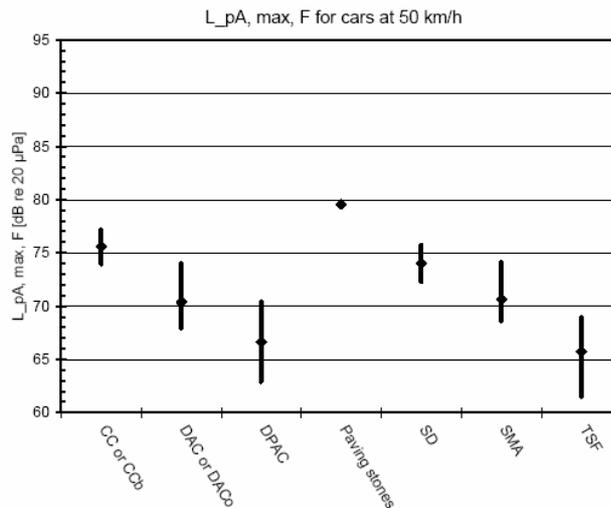


Figura 4.5 – Valor máximo, mínimo e médio para cada tipo de pavimento e para veículos a 50 Km/h [Andersen et al., 2006]

Nas Figura 4.6 e Figura 4.7 são apresentados os valores de ruído emitidos para velocidades de 80 e 110 Km/h. Também para estas velocidades, verifica-se que a camada delgada e a camada duplamente porosa apresentam as emissões de ruído mais baixas. Genericamente, são observados os mesmos tipos de pavimento, quer para velocidades altas de 80 e 110 Km/h como para velocidades baixas (50 Km/h). Considerou-se a camada em betão betuminoso como ponto de referência, tanto para velocidades de 80 Km/h, como para velocidades de 100 Km/h. Para essas camadas o ruído apresenta um incremento de 8 dB(A) quando a velocidade passa de 50 para 80 Km/h e de 12 dB(A) quando se compara com os 110 Km/h.

Para auto-estradas a velocidades de 110 Km/h, as camadas de pavimento mais ruidosas são as camadas em *Hot Rolled Asphalt* (HRA) e os revestimentos superficiais (SD). 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). Igualmente, verifica-se que a variação dos níveis de ruído para estradas com velocidade de circulação alta é de 11 dB, semelhante a estradas com velocidades baixas [Andersen et al, 2006].

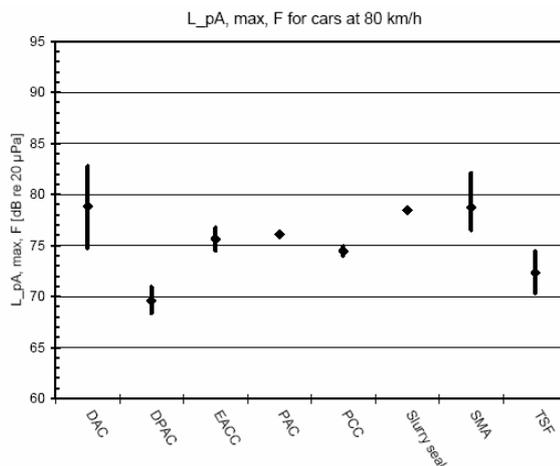


Figura 4.6 – Valor máximo, mínimo e médio para cada tipo de pavimento e para veículos a 80 Km/h [Andersen et al., 2006]

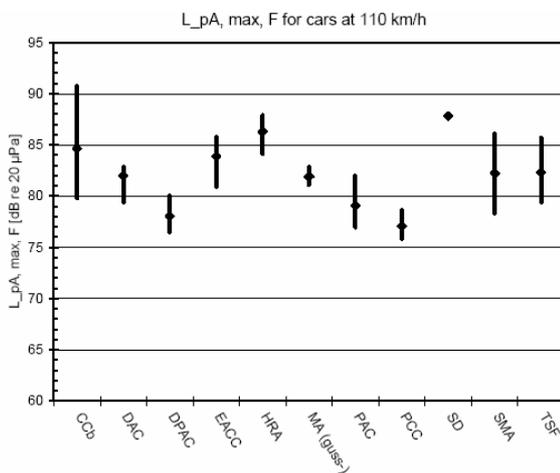


Figura 4.7 – Valor máximo, mínimo e médio para cada tipo de pavimento e para veículos a 110 Km/h [Andersen et al., 2006]

4.2.2 Camadas drenantes/porosas

As primeiras misturas para camadas drenantes foram desenvolvidas a partir de experiências efectuadas nos Estados Unidos na década de 1930. Na Europa, as camadas drenantes foram desenvolvidas pelo Transportation Research Laboratory (TRL) no final dos anos 50, tendo na década de 60 sido testadas em estradas públicas. A primeira superfície permeável foi aplicada em 1967 na M40, no Reino Unido [FEHRL, 2006].

Inicialmente, a superfície foi desenvolvida para reduzir a água à superfície e o efeito de projecção de água em estradas de alta velocidade, durante períodos de pluviosidade intensa (Figura 4.8). No entanto, verificou-se que este tipo de superfície oferecia igualmente vantagens do ponto de vista acústico. Subsequentemente, foram realizadas experiências com betuminoso poroso em muitos outros países europeus e noutras partes do mundo. Nas auto-estradas dos Países Baixos, a superfície drenante de camada única tornou-se a

superfície padrão. Pode afirmar-se que em cerca de 60% da rede, é agora utilizada a superfície drenante de camada única.

Camada de desgaste
em betão betuminoso



Camada de desgaste em
betão betuminoso drenante

Figura 4.8 – Efeito de projecção de água numa camada betuminosa clássica vs. numa camada drenante [Bartolomaeus, 2006]

Uma segunda geração de superfícies drenantes tem vindo a ser desenvolvida. Dentro desta segunda geração estão incluídas as misturas betuminosas em borracha e as duplas camadas porosas (*Twinlayer*).

As camadas drenantes são concebidas de modo a conter um elevado teor de agregados (geralmente, 81-85%) com uma granulometria de 0/11, 0/16 ou 0/20, e um elevado teor de vazios (geralmente > 20%). Como camada de desgaste, a espessura é geralmente de 40 mm.

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 a redução de ruído observada pode essencialmente ser relacionada com a porosidade da superfície e com a espessura da camada. No entanto, os métodos através dos quais se pode medir os efeitos acústicos das superfícies porosas não são inteiramente livres de ambiguidades, pelo que só recentemente têm vindo a ser considerados para efeitos de normalização [Phillips et al., 2003].

Os resultados de ensaios efectuados em larga escala no Reino Unido, demonstraram que os níveis de ruído gerados por veículos podem ser reduzidos até 3-5 dB(A), em relação aos níveis gerados em superfícies de estrada convencionais de betão betuminoso a quente [Nelson and Abbott, 1990]. É de realçar que uma redução de 3 dB(A) é aproximadamente equivalente à redução atingida quando se diminui o fluxo de tráfego para metade.

Embora a redução de ruído atingida através destas superfícies seja muitas vezes descrita como fundamentalmente ligada às características de absorção dos materiais, tal afirmação provém da generalização de um complexo mecanismo de geração e propagação. Estudos efectuados pela TRL e pela Universidade Aberta [Attenborough and Howarth, 1990] determinaram que os benefícios relativos ao ruído, oferecidos pelas superfícies porosas,

dependem parcialmente da complexa interferência que ocorre entre as ondas acústicas, algumas das quais se propagam directamente da fonte do veículo para o receptor, enquanto outras são reflectidas a partir da superfície da estrada, como se mostrou anteriormente na Figura 2.18 do Capítulo 2. No entanto, as superfícies porosas têm o efeito adicional de reduzir as frequências mais altas do ruído causado pelo bombeamento do ar, uma vez que as reservas de canais de ar na camada de superfície, contribuem para dissipar a pressão de ar contido nas ranhura do perfil do pneu.

Para manter as características dos pavimentos porosos relativamente à drenagem de água e ao conforto acústico, ao longo do tempo, é necessário que os vazios da mistura se mantenham comunicantes, o que é conseguido com uma porosidade inicial elevada e com a utilização de ligantes com coesão e aderência elevados.

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 (geralmente realizada com um agregado 11/16), com cerca de 25% de porosidade e por uma segunda camada, com uma espessura compreendida ente os 15 e 25 mm, de granulometria mais fina (geralmente fabricada com um agregado 4/8), 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 Figura 4.9 [Bendtsen and Andersen, 2005].

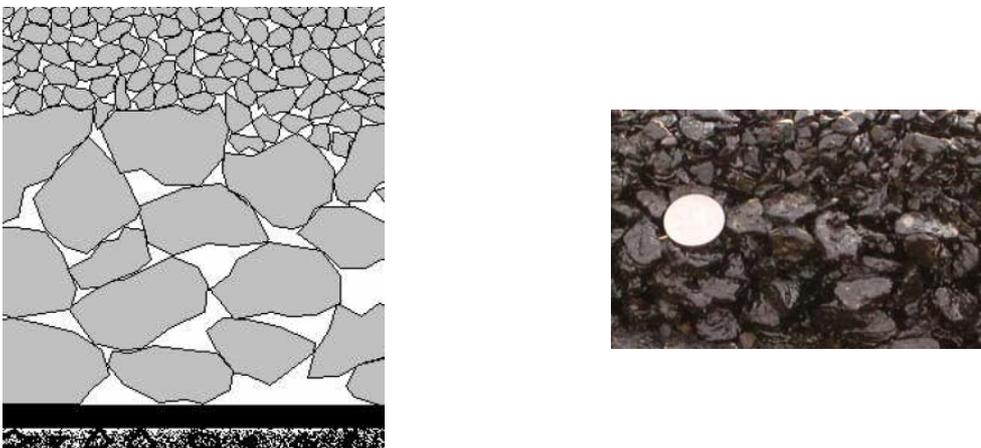


Figura 4.9 – Configuração de uma camada de desgaste drenante constituída por duas camadas porosas [Bendtsen and Andersen, 2005]

Um 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.

Na Figura 4.10 são exibidos os níveis sonoros obtidos para diversas camadas drenantes, na Europa, com diferentes tamanhos de granulometria. Em contraste, com as camadas

drenantes, na Figura 4.11 são apresentados os níveis sonoros para as duplas camadas porosas também na Europa e para diferentes tamanhos de granulometria [Rymer and Donovan, 2005].

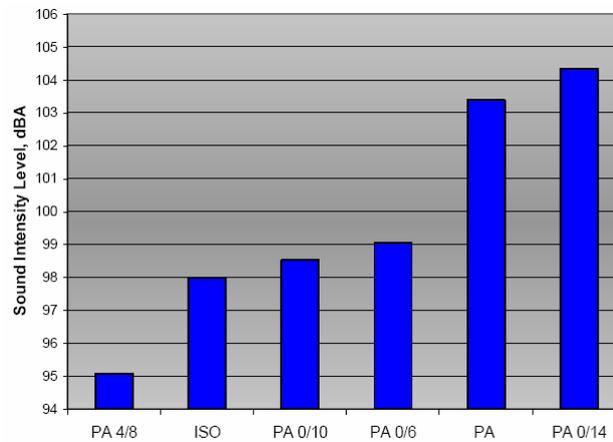


Figura 4.10 – Níveis sonoros em camadas porosas para diferentes tamanhos de agregado [Rymer and Donovan, 2005]

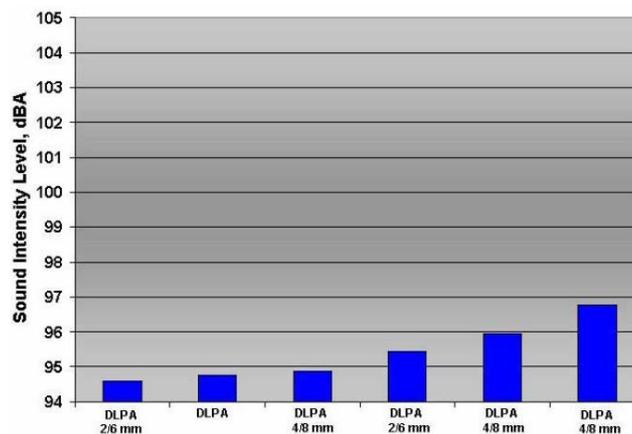
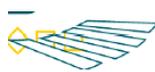


Figura 4.11 – Níveis sonoros em duplas camadas porosas para diferentes tamanhos de agregado [Rymer and Donovan, 2005]

Da análise das Figura 4.10 e Figura 4.11, pode constatar-se algumas das diferenças indicadas para os dois tipos de camadas drenantes, dupla e simples, nomeadamente no que respeita à atenuação de ruído, que poderá ser quantificada na ordem dos 2 dB(A).

Num outro estudo recentemente efectuado na Alemanha, verificou-se que considerando uma camada densa como referência, os valores obtidos para atenuação do ruído na primeira e segunda geração de camadas drenantes (camada drenante simples e dupla) são de 4 e 6 dB(A) respectivamente. Nesse mesmo estudo, concluiu-se também que o desempenho das camadas drenantes simples e duplas, designadas respectivamente por SLPA e TLPA é o apresentado na Figura 4.12 [Hofman, 2006].



Performance (indicative)

	AC	SLPA	TLPA
• Initial Noise Reduction [dB(A)]	0	4	6
• Constructive Durability [years]	12	10	7
• Initial Skid Resistance	+	o	o ¹
• Rutting Resistance	-	+	+
• Splash and spray	-	+	+ / ++



¹ Additional measure might be necessary

Figura 4.12 – Performance de uma camada de desgaste drenante tradicional (SLPA) e de uma camada drenante dupla (TLPA) [Hofman, 2006]

4.2.3 Pavimentos eufónicos/modulares

Conforme referido anteriormente, 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. Vários foram os pavimentos modulares testados no âmbito do projecto holandês “Estradas para o Futuro”. Contudo, alguns destes pavimentos continuam a sofrer testes subsequentes no âmbito do programa nacional de inovação do ruído Dutch IPG [FEHRL, 2006].

O conceito subjacente a uma superfície modular assenta no facto da superfície ser constituída por diferentes camadas, potencialmente pré-fabricadas, sendo que cada camada cumpre um objectivo particular, por exemplo redução de ruído, permeabilidade à água, etc. Os pavimentos testados foram os seguintes:

- 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 Rollable Road: Ressoadores Helmholtz em betão de cimento com duas camadas superiores finas em betão betuminoso poroso enrolável, que oferecem uma previsão de redução de ruído de 10 dB(A), em relação à superfície de referência de betão betuminoso holandesa;
- The Very Silent Noise Module: Ressoadores Helmholtz em betão de cimento com uma camada superior muito fina de pavimento silencioso, que oferece uma previsão de redução de ruído de 13 dB(A), em relação à superfície de referência de betão betuminoso holandesa.

- Rollpave (anteriormente 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;

A Figura 4.13 apresenta exemplos de superfícies Modielab, Rollable Road e Rollpave. As medições realizadas em trechos de ensaio, construídos em verdadeira grandeza, no local de obra, indicaram reduções de ruído iniciais muito inferiores às previsões, na ordem dos 5-7 dB(A) em relação a uma superfície de referência de betão betuminoso. As superfícies Modieslab e Rollpave estão a ser objecto de mais ensaios no âmbito do programa de inovação nacional para o ruído Dutch IPG [FEHRL, 2006].



Figura 4.13 – Exemplos de superfícies de estrada modulares testadas durante o projecto holandês “Estradas para o Futuro” [FEHRL, 2006]

4.2.4 Camadas elásticas

As camadas elásticas, geralmente são um betão betuminoso ou *Stone Mastic Asphalt* (SMA) com adição à mistura de uma determinada percentagem de granulado de borracha, com uma espessura de 2,5 cm, apresentando uma porosidade bastante superior a 20% e contendo entre 8 a 10% de ligante.

É possível produzir o betão betuminoso de borracha através de dois processos, o seco e o húmido. No caso do processo seco, a borracha pode ser adicionada sob a forma de granulado a uma mistura betuminosa (geralmente 3 a 6% vezes o peso total), enquanto que no processo húmido, a borracha pode também ser adicionada em pó (até 15%, geralmente 7%) para modificar o ligante. O processo húmido é por vezes utilizado para melhorar a qualidade do ligante em superfícies porosas.

Segundo Sandberg e Ejsmont (2002), até 2002 não havia provas conclusivas de que a adição de pequenas quantidades de borracha a uma camada de desgaste betuminosa pudesse reduzir significativamente o seu ruído. Por outro lado, Donovan (2005) efectuou uma campanha de aferição comparativa, quer nos Estados Unidos (Arizona e Califórnia), quer na Europa, com o seu equipamento de medição do tipo CPX, baseado na técnica de intensidade do som. Neste estudo, foram registados níveis de ruído para duas camadas de betão betuminoso poroso, entre 94,5 e 95,6 dB(A) e para o denominado betão betuminoso de borracha, entre 95,5 e 97,5 dB(A) [Descornet and Goubert, 2006].

Num estudo recente foram avaliados os níveis sonoros para diferentes tipos de camadas (Camada densa – DENAP, Camada drenante simples e dupla – SDAP e DDAP e 3 secções de Camada betuminosa em Borracha – PERS#1-3). Nestas camadas foram testados veículos ligeiros e veículos de grandes dimensões, sendo na Figura 4.14 apresentados os valores dos níveis de potência sonora obtidos.

A redução de ruído é definida neste estudo como sendo a diferença nos níveis de potência sonora entre estes pavimentos “silenciosos” e os pavimentos (DENAP). É muito interessante notar que a diferença entre o nível de pressão sonora nas camadas com borracha se torna mais elevada à medida que a velocidade aumenta. Esta tendência é particularmente observável nos veículos de grandes dimensões. O efeito de redução do ruído nas camadas drenantes (simples e duplas), com veículos ligeiros e pesados é de 4-7 dB e 2-5 dB, respectivamente, e o das camadas em borracha é de 7-11 dB e 5-8 dB, respectivamente [Fujiwara et al, 2005].

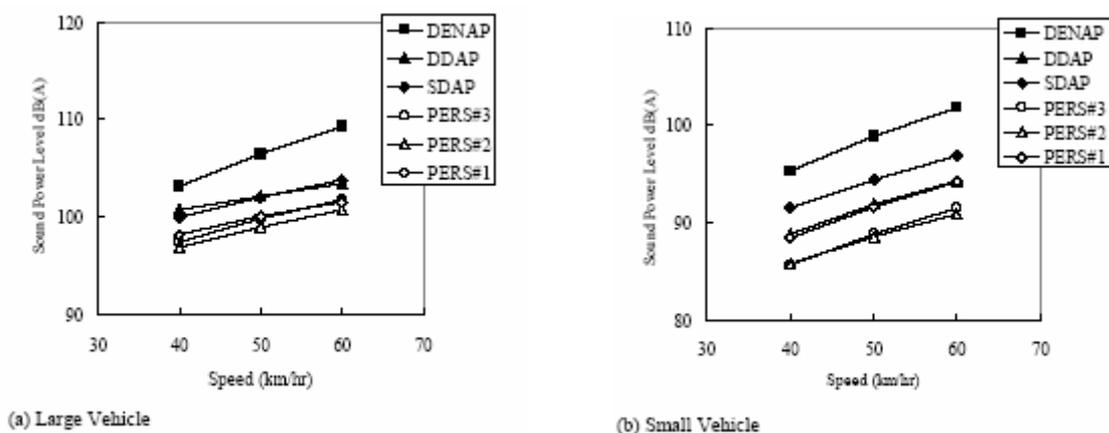


Figura 4.14 – Níveis de potência sonora em camadas densas, drenantes e de borracha [Fujiwara et al, 2005].

Em Portugal têm vindo a ser realizados estudos para avaliar a influência dos pavimentos em betão betuminoso de borracha, no ruído gerado pela circulação rodoviária. Estudos elaborados pela Auto-Estradas do Atlântico (2004) na Auto-Estrada A8, analisam um pavimento em mistura betuminosa aberta com betume modificado a partir de borracha reciclada de pneus (BMB), por comparação com um pavimento de betão betuminoso rugoso convencional (BBR) e um pavimento em betão armado contínuo (BAC).

A granulometria utilizada no betão betuminoso com borracha foi de 0/12 enquanto que no betão betuminoso rugoso (BBR), a granulometria utilizada foi de 0/14 mm.

Neste estudo, concluiu-se que existem diferenças médias na ordem de 5 a 6 dB (A) entre os níveis sonoros globais emitidos pelas camadas em betão betuminoso de borracha e em betão betuminoso rugoso.

Além disso, a utilização de pavimentos betuminosos com borracha permite reduzir significativamente a emissão de ruído do tráfego, na ordem de 8 a 10 dB quando comparados com pavimentos em Betão Armado Contínuo [Certiprojecto, 2004].

Um outro caso de aplicação de mistura com betume modificado com borracha de pneus foi o do lanço do IC24/A41, no troço entre o Freixieiro e Alfena. No caso em estudo foi aplicada uma mistura betuminosa descontínua em camada de desgaste com betume modificado com borracha de pneus, procurando assim criar uma mistura anti-ruído. Nesta camada a granulometria utilizada foi de 0/11 mm e a porosidade obtida de 18,3%.

Os estudos realizados demonstram ser possível obter uma redução sonora em 3-5 decibéis na área próxima do tramo da via em questão [Gomes e Seixas, 2006].

As superfícies designadas por poro-elásticas 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% e uma percentagem de borracha na ordem dos 20%.

As camadas poro-elásticas (PERS) 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, visto que as fórmulas existentes são também bastante caras devido ao elevado número de ingredientes caros (resina) [Descornet and Goubert, 2006].

Com o objectivo de desenvolver e ensaiar uma superfície de estrada poro-elástica (PERS) que pudesse fornecer uma redução de ruído rodoviário durável, em Estocolmo, numa rua com tráfego ligeiro e pesado (8% pesados e limite de velocidade de 50 Km/h), foram estudados três tipos de superfícies elásticas. A superfície Tokai, a Rosehill e a Spentab (Figura 4.15) [Sandberg e Kalman, 2005].

A Superfície Tokai foi construída a partir de painéis de borracha pré-fabricada com 1x1m², importados do Japão (Tokai Rubber Industries Ltd.). A superfície foi aplicada apenas numa pequena área, ou seja, marca de duas rodas de 2x36 m². Tratou-se de uma superfície similar a uma anteriormente aplicada no Japão, mas desta vez com o atrito melhorado.

A Superfície Rosehill foi construída a partir de painéis de borracha pré-fabricados com 1x1 m², produzidos no Reino Unido (Rosehill Polymers, Ltd.), com base em especificações do Instituto Sueco para a Pesquisa em Estradas e Transportes Nacionais (VTI). De registar que os painéis tinham arestas chanfradas.

Superfície Spentab: Mistura à base de borracha construída in-situ, projectada por Bjorn e Kalman da VTI e produzida por Spentab AB, uma companhia sueca que produz superfícies similares para parques infantis e zonas de desporto [Sandberg e Kalman, 2005].



Figura 4.15 – Superfícies de estrada poro-elásticas em Estocolmo, Suécia [Sandberg e Kalman, 2005].

A Figura 4.16 apresenta os resultados dos ensaios de ruído realizados pelos métodos CPX e CPB a 50 Km/h e demonstra que a superfície Rosehill é um pouco menos eficiente na redução de ruído do que as outras duas. Um dos motivos para este facto poderá prender-se com a chanfradura nas arestas dos painéis de borracha, a qual cria um “canal” em forma de v, com um espaçamento de cerca de 10 mm, em intervalos de 1 m. Os painéis Tokai não tinham chanfradura, logo as juntas entre os painéis eram relativamente lisas (isto é, aproximadamente 2 mm com espaços entre painéis). A passagem de pneus pelas juntas entre os painéis Rosehill era claramente audível, constituindo pois uma possível explicação para os níveis de ruído ligeiramente mais elevados detectados para esta superfície [Sandberg e Kalman, 2005].

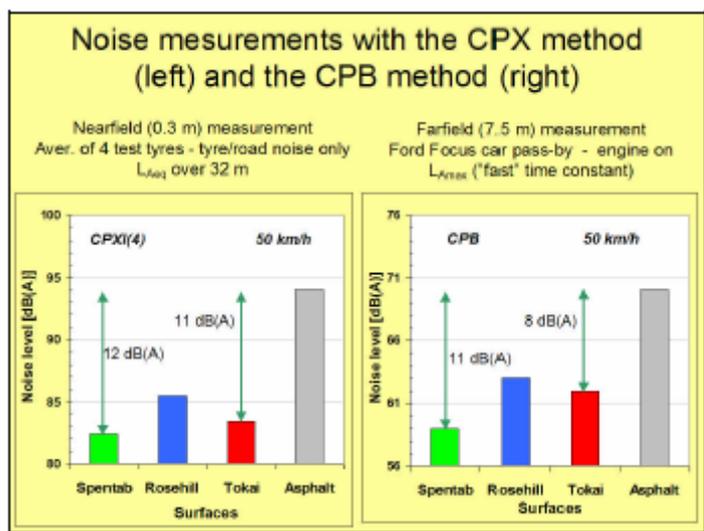


Figura 4.16 – Resultados das medições CPX (esquerda) e CPB (direita) nas secções de teste, a uma velocidade de teste de 50 Km/h [Sandberg e Kalman, 2005].

4.2.5 Tratamentos superficiais

A identificação com precisão de onde e quando começou o desenvolvimento dos tratamentos superficiais é difícil, mas atribui-se geralmente o seu início a um trabalho efectuado na Alemanha na década de 60. Estes tratamentos foram sobretudo desenvolvidos

na Europa, tendo a Alemanha, a França, os Países Baixos e a Inglaterra assumido neste aspecto um papel de relevância. A tecnologia das camadas delgadas registou um considerável desenvolvimento em França na década de 80, altura em que vários protótipos de superfícies foram aplicados.

Em Portugal podem encontrar-se três tipos de tratamentos superficiais, o microaglomerado betuminoso a frio, o revestimento superficial betuminoso e a lama asfáltica (*Slurry Seal*).

O microaglomerado betuminoso a frio pode ser simples ou duplo. O microaglomerado betuminoso simples consiste na aplicação de uma mistura de agregado de granulometria 0/6 e de uma emulsão modificada com um teor em betume mínimo de 60%. Quando o microaglomerado for duplo, faz-se uma primeira aplicação de uma mistura de emulsão modificada com agregado 0/4, realizando-se numa segunda fase a colocação de outra mistura com a granulometria 4/8.

O revestimento superficial betuminoso pode ser simples, simples com duplo espalhamento de gravilha, e duplo. Consiste essencialmente em espalhar uma ou mais camadas de aglutinante betuminoso (betume ou emulsão betuminosa), espalhando seguidamente agregado fino que é cilindrado de modo a ficar incrustado no ligante.

A lama asfáltica (*Slurry Seal*) é constituída por agregados finos e emulsão betuminosa e não ultrapassa os 2 cm de espessura depois de colocada. Aplica-se no tratamento superficial dos pavimentos, essencialmente em colmatação de fissuras, com o intuito de os impermeabilizar e lhes conferir boas características de rugosidade [Pereira e Picado-Santos, 2002].

Embora possa haver diferentes prioridades nacionais relativamente às propriedades requeridas por estes revestimentos, a necessidade de um perfil de superfície durável e macio, resistente a rodagens, à derrapagem e à entrada de água, é comum.

Uma das características das superfícies delgadas é o facto de terem propriedades que proporcionam a redução do ruído, o que em parte é atribuído ao tamanho geralmente pequeno dos agregados utilizados. Adicionalmente, o facto da textura da superfície ser fornecida por agregados revestidos e não pelo revestimento da superfície com agregados, também contribui para uma geração de ruído mais baixo. Finalmente, a natureza do índice de vazios determinada por uma textura positiva ou negativa da maior parte de superfícies delgadas contribui para reduzir o ruído devido ao bombeamento do ar e de outros mecanismos de geração de ruído.

Os tratamentos superficiais têm as seguintes vantagens:

- Apresentam uma combinação de boa resistência à deformação e à fadiga, o que é possível graças ao esqueleto do agregado e à relativamente elevada percentagem de ligante, respectivamente;

- Oferecem uma textura negativa, que tende a gerar níveis mais baixos de ruído do pneu;
- Para além da geração de menos ruído, a textura e configuração da camada de superfície resulta numa menor projecção de água (*spray*);
- Uma vez que a partir dos materiais que o constituem se pode obter camadas relativamente delgadas, estas podem ser aplicadas rapidamente, cobrindo vastas áreas e minimizando assim as interrupções do tráfego;
- Foi demonstrado que é possível reciclar até 70% dos materiais utilizados nos tratamentos superficiais.

Por sua vez, apresentam as seguintes desvantagens:

- Devido à presença da película de ligante, a resistência à derrapagem poderá ficar reduzida durante os primeiros meses de operação;
- Dada a maior exigência em termos de características de resistência à derrapagem, os tratamentos superficiais geralmente usam um agregado com elevado coeficiente de polimento acelerado, o qual se tem vindo a tornar mais raro e mais caro, tendo que ser frequentemente transportado ao longo de grandes distâncias, até ao local de obra;
- Dependendo do facto dos materiais terem betumes modificados por polímeros, e da natureza do modificador, a reciclagem pode comportar riscos adicionais de segurança e saúde.

Para enquadrar os níveis de ruído associados aos tratamentos superficiais, apresenta-se a Figura 4.17. As diferentes superfícies foram avaliadas através do método da proximidade estrita (CPX- *Close Proximity Method*).

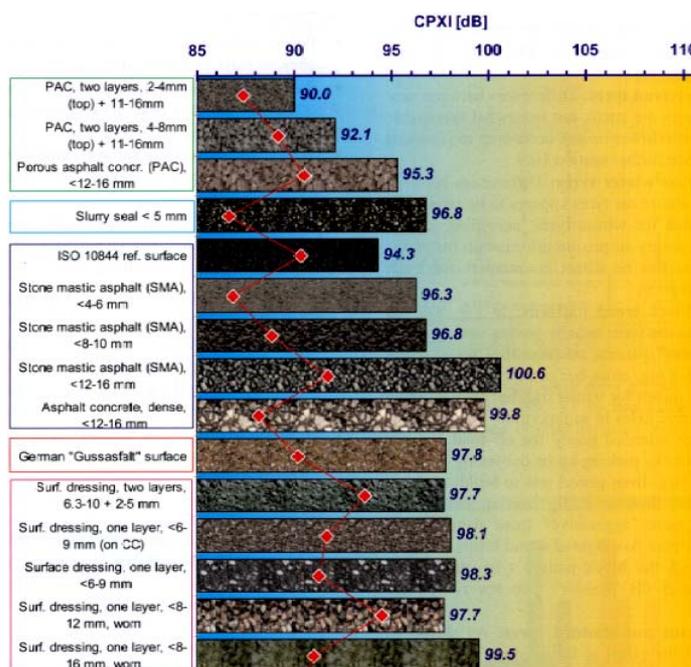


Figura 4.17 – Níveis de ruído obtidos pelo método de Close Proximity em diferentes tratamentos superficiais [Sandberg and Ejsmont, 2002]

A amplitude dos valores obtidos para as diferentes superfícies é larga. No entanto, é de referir que estes incluem os extremos reais, tais como uma nova e muito eficiente superfície porosa no valor inferior e algumas superfícies muito velhas (SMA-*Stone Mastic Asphalt*) no valor superior. Porém, excluindo os extremos, quando analisados os valores obtidos para uma dupla camada drenante (90 dB) e para os tratamentos superficiais (últimos exemplos), pode-se dizer que a respectiva diferença atinge a ordem dos 7 a 10 dB.

De igual modo, se comparados os valores obtidos para a camada em betão betuminoso (99,8 dB) com a camada em betão betuminoso drenante (95,3 dB) a diferença é de 4,5 dB.

4.2.6 Classificação das camadas superficiais em função do ruído

Dada a variabilidade das características dos materiais usados nas camadas superficiais que se observa de país para país, a tarefa de classificar essas mesmas camadas em função do ruído demonstrou ser complexa. Vários países tentaram categorizar as camadas superficiais, tendo por referência o nível de ruído relativo a uma superfície tomada por referência. Os ajustes ou correções que daí podem resultar dependem, para além das características das camadas, de factores como a velocidade de circulação, do tipo de veículos, da inclinação longitudinal da estrada e do método de ensaio, sendo este último determinante [Descornet and Goubert, 2006].

A título de exemplo das tentativas de classificação do ruído rodoviário em função do tipo de superfície apresenta-se no Quadro 4.2, o qual ilustra a classificação proposta pelo Grupo de Trabalho 8 (WG8) da Comissão Europeia. Outros exemplos podem ser encontrados na publicação “Noise Classification of Road Pavements” [Descornet et al., 2006].

Quadro 4.2 – Factores de correcção em dB(A) relativos a uma superfície em betão betuminoso 0/11 para a velocidade de 50 Km/h [Descornet et al., 2006]

<i>Road surface type</i>	<i>Light vehicles</i>	<i>Heavy vehicles</i>
Porous asphalt twin layer, less than 3 years old	-6.0	-4.5
Porous asphalt twin layer, 3-5 years old	-4.0	-3.0
Porous asphalt 0/11, less than 3 years old	-3.1	-3.7
Porous asphalt 0/11, 3-5 years old	-2.0	-2.0
Porous asphalt 0/16, less than 3 years old	-2.0	-3.0
Porous asphalt twin layer, more than 5 years old	-2.0	-1.5
Porous asphalt 0/16, 3-5 years old	-1.0	-1.5
Asphalt concrete 0/11	0.0	0.0
Stone mastic asphalt 0/11	0.0	-0.3
Porous asphalt 0/11, more than 5 years old	0.0	0.0
Porous asphalt 0/16, more than 5 years old	0.0	0.0
Cement concrete, burlap treated	1.0	1.2
Hot rolled asphalt	2.0	1.0
Asphalt concrete 0/16	2.0	0.0
Porous asphalt 0/8, less than 3 years old	-5.8	-3.7
Even pavement stones	3.0	2.0
Grip-surface	1.3	0.4
Porous asphalt 0/8, more than 5 years old	-0.4	0.0
Cement concrete, exposed aggregate	1.3	0.4
Cement concrete, longitudinally brushed	1.3	1.7
Porous asphalt 0/8, 3-5 years old	-3.8	-2.0
Surface dressing 0/11	1.5	0.5
Uneven pavement stones	6.0	4.0
Gussasphalt	1.9	-0.3
Cement concrete, transversely brushed	3.7	2.1

Outro exemplo de tabela de comparação das propriedades acústicas, para o caso de superfícies Holandesas e Alemãs, é apresentado na Figura 4.18 [Bartolomaeus, 2006].

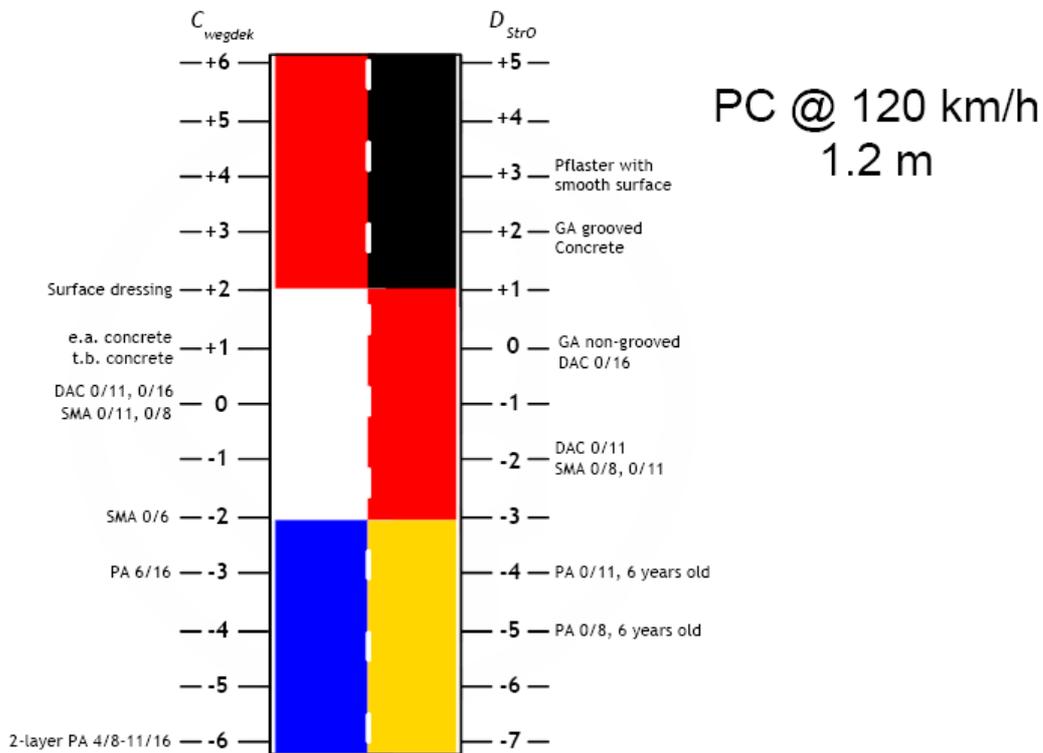


Figura 4.18 – Tabela de comparação das propriedades acústicas para o caso de superfícies Holandesas e Alemãs [Bartolomaeus, 2006].

Quando se comparam os valores da Figura 4.18 com os valores obtidos, em Portugal, para as camadas em betão betuminoso drenante, verifica-se que são semelhantes.

4.3 Evolução do estado da superfície

4.3.1 Degradações

As degradações das camadas de desgaste estão relacionadas essencialmente com a qualidade dos materiais e com a agressividade do tráfego, podendo também ser resultantes da evolução do fendilhamento numa fase avançada.

As degradações podem ser caracterizadas em famílias que por sua vez se subdividem em vários tipos de degradações.

Nos pavimentos flexíveis, as degradações podem ser caracterizadas em quatro famílias: deformações, fendilhamento, desagregação e movimento de materiais.

Nos pavimentos rígidos estas famílias são caracterizadas por: fendilhamento das lajes; desagregação superficial e escalonamentos da laje [Pereira e Picado-Santos, 2002].

Independentemente de um pavimento apresentar boas características acústicas, o nível de ruído pode aumentar devido à presença de um ou outro tipo de degradação. Dependendo da sua gravidade, as degradações podem ter um impacto maior ou menor sobre o ruído gerado.

Muito frequentemente este tipo de impacto encontra-se bem localizado. Isto é, alguns metros para a frente e para atrás da degradação, o nível de pressão sonora já não é afectado. No entanto, quando uma área de maiores dimensões é afectada por vários tipos de degradações, o impacto pode ser mais significativo [Berengier, 2005].

Apesar de se ter verificado que as degradações influenciam o nível de ruído, ainda não existem estudos que permitam estabelecer relações entre um dado incremento de ruído e a patologia associada, verificando-se a necessidade da sua realização.

4.3.2 Irregularidades

As irregularidades das superfícies dos pavimentos encontravam-se divididas em três categorias, a micro-textura, a macro-textura e a irregularidade. Os estudos do ruído pneu/pavimento levaram os investigadores rodoviários a introduzir uma nova gama de irregularidades, a mega-textura, que se situa entre a macro-textura e a irregularidade [Wayson, 1998].

Na Figura 4.19 apresenta-se os tipos de irregularidades, ordenados pelos respectivos limites de comprimentos de onda, e a sua influência em diferentes funções da superfície [Chavet et al., 1987].

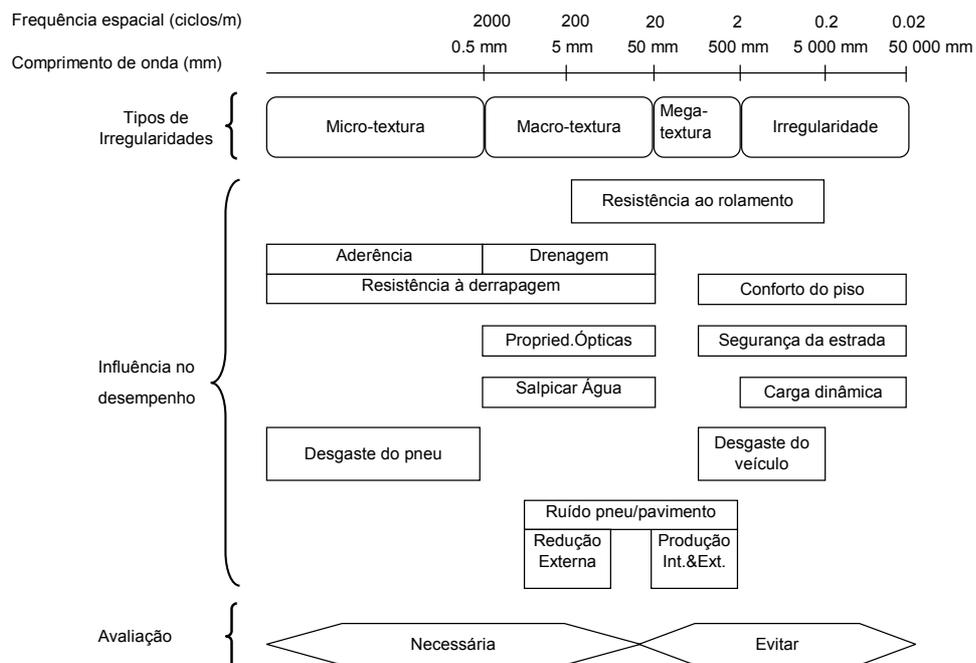


Figura 4.19 – Tipos de irregularidades e a sua influência em diferentes funções da superfície [Chavet et al., 1987]

A parte inferior da Figura 4.19 ilustra a gama de textura aproximada dos comprimentos de onda que influenciam os parâmetros da superfície, incluindo a resistência ao rolamento, a resistência à derrapagem e o ruído pneu/pavimento. Por exemplo, comprimentos de onda cuja textura se situe na gama da macro e mega-textura, isto é, $0.5 \text{ mm} < \lambda < 500 \text{ mm}$, são importantes no controlo do ruído pneu/pavimento. Além disso, os comprimentos de onda de texturas nesta região são importantes também no controlo da resistência quer ao rolamento, quer à derrapagem.

Aumentar as amplitudes de texturas importantes à garantia do adequado desempenho à derrapagem, pode ter uma influência ambivalente sobre o ruído pneu/pavimento. Aumentar a amplitude da textura em comprimentos de onda na gama da micro-textura exercerá pouca influência sobre a geração de ruído pneu/pavimento. Na gama de macro-textura, o aumento da amplitude de comprimentos de onda poderá reduzir o ruído pneu/pavimento, ao diminuir a influência dos mecanismos aerodinâmicos que geram ruído. Aumentar as amplitudes de textura em comprimentos de onda próximos da transição entre a macro e a mega-textura pode exercer um efeito negativo sobre o ruído, ao aumentar as vibrações do pneu, gerando níveis de ruído pneu/pavimento mais elevados [FEHRL, 2006].

Assim, é possível projectar superfícies de estrada que contenham quer um adequado desempenho à resistência, quer com baixos níveis de ruído. A solução será a de assegurar que as amplitudes da textura que contribuem para os requisitos de segurança da superfície, se situem em texturas de comprimento de onda que não aumentem os níveis de ruído pneu/pavimento e, preferencialmente, que tenham uma influência positiva sobre a redução desse ruído.

A micro-textura e a irregularidade não parecem ter uma influência detectável sobre o ruído pneu/pavimento. Todavia, as relações entre estes tipos de irregularidades e o ruído ainda não foram adequadamente estudadas.

Por sua vez, as relações entre a macro-textura, a mega-textura e o ruído são notórias. A Figura 4.20 apresenta a correlação entre o espectro de ruído do pneu e o espectro de perfil de superfícies de um automóvel sobre vários tipos de superfícies de estrada, estabelecida por Descornet and Sandberg em 1980 [Descornet and Sandberg, 1980].

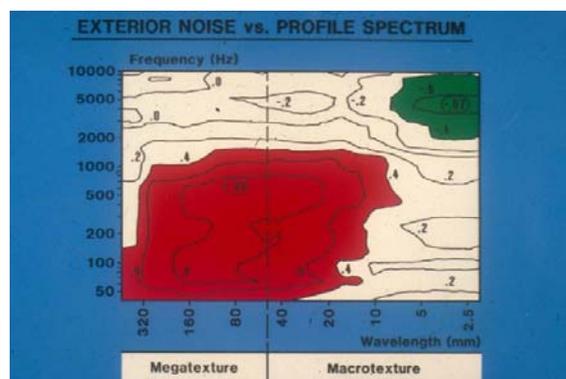


Figura 4.20 – Espectro de ruído versus espectro da textura [Descornet and Sandberg, 1980]

Dois domínios de correlação muito significativos surgem: os componentes de ruído de baixa frequência estão correlacionados positivamente com os componentes de textura de frequência longa; os componentes de ruído de alta frequência estão correlacionados negativamente com os componentes de textura de baixa frequência. Este cenário foi confirmado pelos estudos desenvolvidos nos Estados Unidos [Clapp, 1985] e Japão [Noda et al, 1998]. Estes dois efeitos opostos da textura explicam porque as potenciais características de ruído de uma superfície não podem ser previstas a partir de um único valor ou avaliação global da textura, como a profundidade da zona de impacto [Descornet, 2005].

Tendo em conta a importância da textura da superfície dos pavimentos, devido à sua influência nos mecanismos de geração de ruído, amplificando ao reduzindo o ruído produzido, no capítulo 5 apresentam-se vários conceitos essenciais assim como se desenvolve-se este assunto com detalhe.

4.4 Requisitos para a obtenção de uma camada superficial silenciosa

Sandberg e Ejsmont (2002) e mais recentemente 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 mega-textura e macro-textura nos comprimentos de onda de 10-50 mm;
 - Deverá obter-se a máxima macro-textura nos comprimentos de onda de 1-8 mm.

- b) Nas camadas superficiais porosas:
 - Deverá obter-se a mínima mega-textura e macro-textura 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.

5 INFLUÊNCIA DA TEXTURA DOS PAVIMENTOS

Actualmente admite-se a existência de uma série de factores relativos à textura da superfície das estradas que representam diferentes funções na melhoria das características de resistência à derrapagem e de geração de ruído.

Uma diferença importante, entre superfícies, que exerce um elevado efeito sobre a geração do ruído, consiste no grau de protuberância das partículas de agregado em relação à zona de contacto do pneu. Deste modo, conforme o grau de protuberância se manifestar à superfície pode originar texturas positivas e/ou texturas negativas. É natural que, este grau de protuberância estará também associado a forma que o agregado apresenta.

Os métodos mais tradicionais para caracterizar a textura das superfícies dos pavimentos são a mancha de areia e o pêndulo britânico. No entanto, com a recente evolução dos equipamentos a laser, a profundidade da textura também pode ser aferida com recurso aos mesmos.

Assim, neste capítulo serão apresentados os diferentes tipos de textura, alguns métodos de caracterização e estabelecer-se-á a relação entre a textura e os níveis de ruído.

5.1 Definição da textura

A textura da estrada difere do plano relativo ao nível médio da superfície e pode ser descrita por dois parâmetros: amplitude (desvio vertical) e comprimento de onda (periodicidade horizontal).

A Comissão Técnica para as Características das Superfícies, da Associação Internacional Permanente de Congressos Rodoviários (PIARC), da Associação Mundial de Estradas, definiu os vários comprimentos de onda das irregularidades das superfícies, da seguinte forma [PIARC, 1991]:

a) Micro-textura (textura com comprimento de onda de 0,5 mm ou menos):

Esta é a região do espectro da textura que se encontra associada à aspereza dos agregados, em pequena escala, e é responsável pelo componente de aderência e atrito entre o pneu e a superfície de pavimento.

b) Macro-textura (textura com comprimento de onda entre 0,5 e 50 mm):

A macro textura é importante por permitir a dispersão da água da superfície, fornecendo canais de drenagem na superfície. A macro-textura é obtida pela proporção adequada do agregado e argamassa da superfície ou por técnicas de acabamento de superfícies.

c) Mega-textura (textura com comprimento de onda entre 50 e 500 mm):

A mega-textura é frequentemente materializada por orifícios, buracos (numa fase acentuada da degradação), ondulação e desníveis. Trata-se de uma característica geralmente não desejável, que tem efeitos prejudiciais em termos de atrito e de ruído.

Na Figura 5.1 apresenta-se a diferença entre micro, macro e mega-textura em termos de comprimento de onda e profundidade.

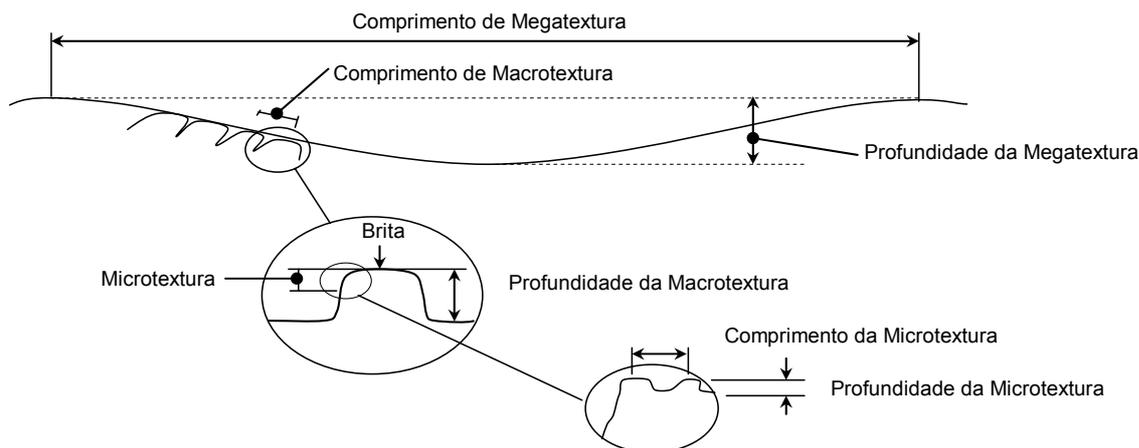


Figura 5.1 – Detalhes dos comprimentos e profundidades de textura [DMRB-HD 36/99, 1999]

Na Figura 5.2 apresenta-se esquematicamente os intervalos de amplitude e de comprimento de onda relativos a cada tipo de irregularidades, incluindo a divisão da irregularidade em pequenas (P.O.), médias (M.O.) e grandes (G.O.) ondas [Pereira et al, 2006].

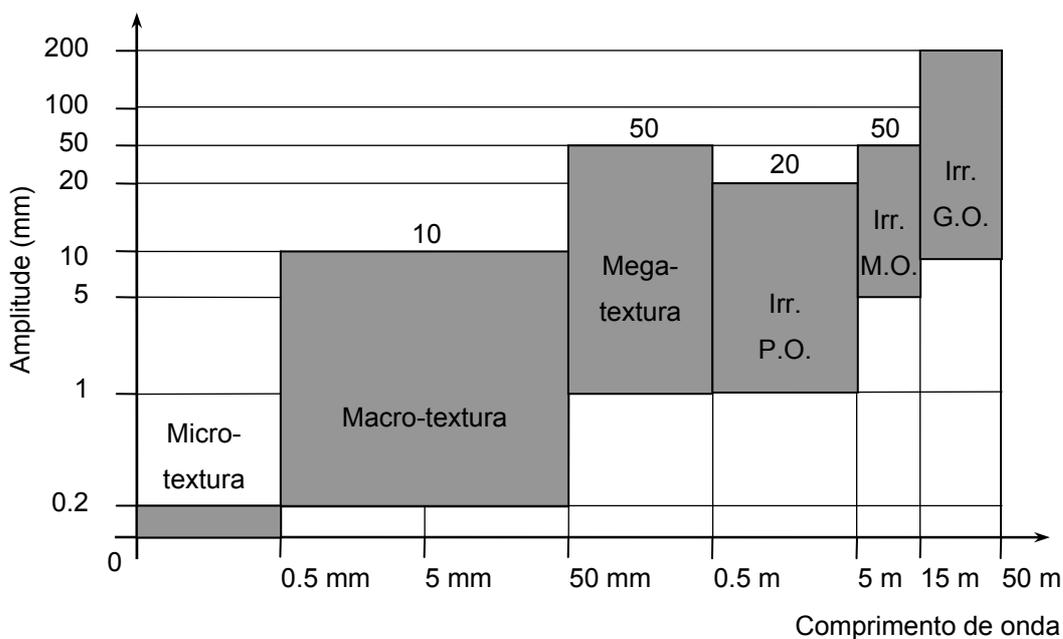


Figura 5.2 – Definição das irregularidades em função da amplitude e do comprimento de onda [Pereira et al, 2006]

Actualmente, admite-se a existência de uma série de factores relativos à textura cujo controlo permite uma melhoria das características de resistência à derrapagem e de geração de ruído. Deste modo, podem-se distinguir os diferentes tipos de textura através da definição influência de cada tipo nas funções funcionais e “ambientais” por cada um, como se segue:

- A micro-textura de grau fino dos agregados de superfície é o elemento que mais contribui para a resistência à derrapagem, sendo também o factor dominante na determinação da resistência à derrapagem a baixas velocidades;
- A macro-textura oferece rápidos canais de drenagem entre o pneu e a superfície de estrada, contribuindo para a resistência à derrapagem em condições molhadas a altas velocidades e permitindo a libertação do ar preso sob o pneu (bombeamento do ar);
- A mega-textura, numa escala comparável à zona de contacto do pneu, está especialmente associada ao ruído do pneu;
- A irregularidade, nas escalas mais longas, provoca movimentos da suspensão e dos pneus que afectam a condução dos veículos.

Os efeitos das irregularidades sobre a deformação dos pneus são apresentados na Figura 5.3.

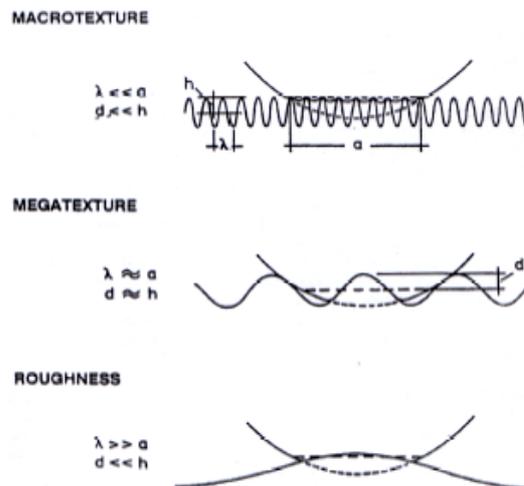


Figura 5.3 – Efeitos sobre a deformação dos pneus [Wayson, 1998]

5.2 Métodos de caracterização da textura

As características da textura das superfícies de pavimento têm um efeito significativo sobre o ruído de pneu gerado pelos veículos. Por este motivo, o método de caracterização das propriedades da textura de superfícies de estrada é imprescindível para o estudo do ruído pneu/pavimento.

Para caracterizar esta propriedade tem-se vindo a desenvolver muitos métodos e equipamentos de medição, desde há várias décadas. Os métodos para caracterização da

textura mais utilizados são a mancha de areia, o pêndulo britânico e os perfilómetros a laser (como por exemplo o Rosan e o CTMeter). A Universidade do Minho desenvolveu também um instrumento (Texscan) que permite analisar o espectro da textura.

5.2.1 Mancha da areia

O método da mancha de areia foi um dos primeiros ensaios destinados a avaliar, ainda que indirectamente, o atrito pneu/pavimento.

Este ensaio, apesar de assentar numa técnica tradicional, avalia de facto a rugosidade geométrica do pavimento (macro-textura).

Este método, regulado pela Norma NLT-335/87, consiste no espalhamento cuidadoso de uma determinada quantidade de areia ou esferas de vidro sobre a superfície de forma circular, medindo-se o raio de espalhamento.

Para isso é necessário proceder, com uma escova suave, à limpeza da superfície onde se irá efectuar o ensaio, num raio de 25 cm. Posteriormente, enche-se o recipiente com areia de forma a ficar compactada. Verte-se a areia do recipiente no local de ensaio em forma de superfície cónica, estendendo-a mediante movimentos rotativos, suaves e sem pressão até conseguir uma superfície plana aproximadamente circular (Figura 5.4). Finalmente, mede-se com um compasso o círculo de areia e com o recurso a uma régua obtêm-se o raio médio do círculo de areia.



Figura 5.4 – Ensaio da Mancha de Areia

Tendo conhecimento da quantidade de areia ou vidro e do raio de espalhamento, poderá medir-se a profundidade da textura através da Equação 5.1 [NLT-335/87]:

Equação 5.1:

$$H = \frac{V}{3,1416 \times r^2}$$

em que:

H é a profundidade média da textura superficial (mm);

V é o volume da areia utilizada (mm³);

r é o raio médio do círculo de areia (mm).

5.2.2 Pêndulo britânico

Este método foi desenvolvido na década de 50 pelo Transport and Road Research Laboratory (TRRL) do Reino Unido e continua a ser um dos equipamentos mais versáteis, económicos e de ampla utilização para avaliar a micro-textura.

Este ensaio do tipo pendular é determinado pela Norma ASTM E 303-93 e permite a medição localizada do coeficiente de atrito cinemático, através da avaliação da energia absorvida por atrito, quando a sapata de borracha do pêndulo desliza sobre o pavimento, ou sobre uma amostra de material a ensaiar.

Para isso, a superfície a ensaiar deve estar limpa, isenta de partículas soltas e inundada com água limpa. Faz-se oscilar o pêndulo quatro vezes, após uma primeira oscilação onde não se regista a leitura, molhando de cada uma das vezes a superfície de ensaio, e registando os resultados (Figura 5.5).

As características do pêndulo permitem que este simule o escorregamento dos pneus do veículo, sobre a estrada, à velocidade de 50 Km/h.



Figura 5.5 – Ensaio do Pêndulo Britânico

5.2.3 Perfilómetros a laser

Com o surgimento da robótica e/ou automação tenta-se descobrir formas mais práticas e exactas de medição através de lasers, seccionamentos de luz, estiletos e ultra-sons.

Existem diversos mecanismos a laser para caracterizar a textura do pavimento. A título de exemplo podemos indicar o Rosan e o CTMeter.

O método a laser designado por ROSAN (ROad Surface ANalyzer) é o mais usado nos Estados Unidos (EUA) e tem vindo a ser largamente implementado em substituição do método da mancha de areia. Este método é um sistema automático portátil para a aferição da textura de pavimentos a velocidades de auto-estrada, ao longo de um trajecto linear [Wayson, 1998].

O ROSANvm é uma versão mais sofisticada, desenvolvida a partir das primeiras versões, e resume-se a um sensor a laser, controlado por computador, montado na parte dianteira de

um veículo apropriado. O feixe que é colocado transversalmente ao deslocamento do veículo, tem três comprimentos – 2.1 m, 3.5 m, e 4.9 m – e pesa aproximadamente 46 quilogramas. O ROSANvm pode ser operado a velocidades até 120 Km/h e consegue medir diversos parâmetros tais como o trajecto da roda esquerda, trajecto central, a macro-textura direita, as rodeiras, e a inclinação da estrada. No entanto, o ROSANvm especializou-se na medição da macro-textura, isto é, toda a mudança na superfície do pavimento maior que 0,5 milímetros e menor que 5 milímetros (Figura 5.6) [Koklanaris, 1998].



Figura 5.6 – Perfilómetro a laser ROSANvm [Koklanaris, 1998]

O CTMeter é também um dos métodos que pode ser implementado para determinar a textura de uma superfície de pavimento.

Os procedimentos para realizar o ensaio através do CTMeter são apresentados na norma ASTM E2157. O CTMeter usa um laser para medir o perfil de um círculo com 284 mm (11,2 in) de diâmetro ou 892 mm (35 in) de perímetro (Figura 5.7). O perfil é dividido em oito segmentos de 115,5 mm (4,4 in). A média das médias da profundidade de perfis (MPD) é determinada para cada um dos segmentos do círculo, sendo o valor da textura a média de todas as profundidades dos oito segmentos [Prowell and Hanson, 2005].



Figura 5.7 – CTMeter [Prowell and Hanson, 2005]

Os perfilómetros a laser utilizam um sensor electro-óptico para medir um feixe de laser reflectido no pavimento, tendo sido amplamente comprovados na Alemanha.

O perfilómetro de ligeiro seccionamento utiliza um feixe de luz mais estreito ou extenso, criando uma fina linha iluminada sobre o pavimento. O perfil é determinado a partir da transição entre as finas linhas da margem e o fundo.

O perfilómetro de estilete utiliza um estilete ou agulha que toca no pavimento e é conectado mecanicamente a um transdutor de deslocamento.

O perfilómetro ultra-sónico utiliza um sensor electroacústico. Analisa-se o som ultra-sónico reflectido a partir do solo. Utilizando os dados destes testes, as curvas de perfil que relacionam profundidade do perfil, a amplitude do perfil, e o espectro da textura podem desta forma ser determinados.

O método do feixe da textura recorre a dois sensores de textura, um estilete mecânico e um estilete a laser. Os sensores são usados para medir o movimento vertical. Os traços da textura resultantes são processados para determinar a textura e um espectro de textura.

5.2.4 Equipamento UM – Texscan

Este equipamento constitui um protótipo mecânico para utilização, quer em laboratório quer em campo, e destinando-se à caracterização da textura da superfície dos pavimentos rodoviários, entre outras aplicações, das quais destacamos o controlo de qualidade na análise dimensional dos materiais, como por exemplo o cálculo do índice de alongamento e verificação da presença de segregação.

O equipamento é constituído por uma estrutura de suporte e por um eixo ao qual está acoplado um motor eléctrico, de forma a permitir o deslocamento de um braço mecânico que serve de suporte ao sistema de medição. O sistema de medição é composto por duas câmaras e um laser de linha que permitem realizar o levantamento tridimensional da superfície dos pavimentos (Figura 5.8).

Através do levantamento tridimensional da superfície dos pavimentos é possível obter-se de uma forma muito rápida um conjunto de características superficiais, entre as quais a macro e a mega textura.

Além do exposto, este equipamento proporciona a possibilidade de exportar para ferramentas de análise de elementos finitos, a nuvem de pontos resultante da aquisição tridimensional da superfície dos pavimentos. Esta funcionalidade permite estudar o contacto pneu/pavimento, principal fonte do ruído rodoviário, e a durabilidade e estabilidade de novas camadas de desgaste face a cargas extremamente agressivas.

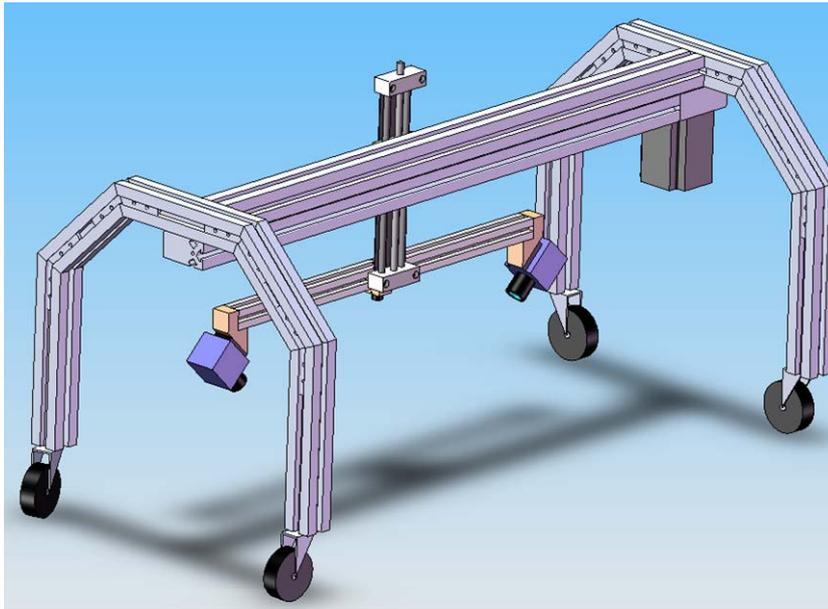


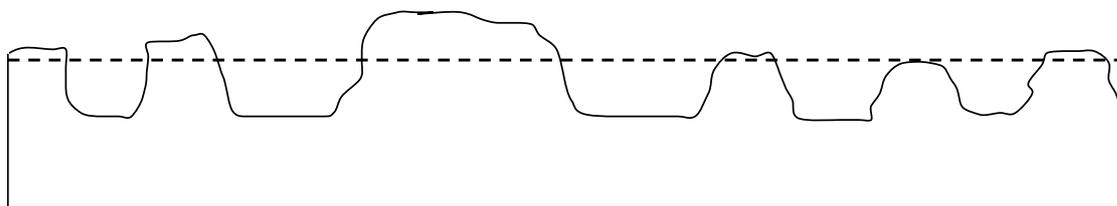
Figura 5.8 – Esquema do perfilómetro 3D Texscan (U.M.)

5.3 Relação da textura com o nível de ruído

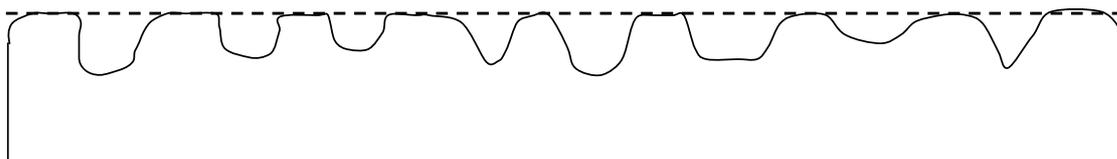
5.3.1 Profundidade média da textura

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

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 Figura 5.9 (a) e (b) [DMRB-HD 36/99, 1999].



Textura Positiva (a)



Textura Negativa (b)

Figura 5.9 – Detalhes de superfícies com texturas positiva (a) e negativa (b) [DMRB-HD 36/99, 1999]

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. A textura positiva pode também ser formada pela remoção da matriz circundante para expor as partículas de agregado (como o betão de agregado exposto). Este termo descreve também a textura formada em betão escovado transversalmente.

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. Pode também ser usado para descrever o betão de cimento ranhurado, especialmente no caso de ranhuras produzidas depois das marcas de escovagem iniciais se terem desgastado pela acção do tráfego.

Os pavimentos em betão betuminoso, revestimento superficial e betão por escovagem são geralmente considerados de texturas positivas, enquanto que os pavimentos em betão betuminoso drenante, os revestimentos delgados e o betão de agregado exposto são geralmente considerados de texturas negativas [DMRB-HD 36/99, 1999].

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 com um baixo índice de lamelação, adaptam-se melhor à superfície, fornecendo uma área mais plana para circulação do pneu e conseqüentemente 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 [DMRB-HD 36/99, 1999].

5.3.2 Espectro de frequência da textura

A superfície da estrada é claramente um factor de grande influência sobre os níveis de ruído gerados pelos pneus, pelo que tem sido alvo de extensa pesquisa. No Reino Unido as medições da TRL demonstram que os níveis de ruído causados por veículos ligeiros sobre diferentes superfícies de estrada podem diferir até 15 dB(A) a uma determinada velocidade.

Uma análise detalhada das características da textura destas superfícies de estrada revelou que uma grande parte da variação dos níveis de ruído registados entre diferentes superfícies de pavimento, pode ser explicada por diferenças na amplitude de certas texturas de comprimento de onda especialmente, na zona da mega-textura [Abbot and Philips, 1996].

Esta situação foi ilustrada num estudo elaborado por Domenichini et al. (1999) que recorreu à análises espectrais com um perfilómetro “Dipstick” e o perfilómetro “Tino 3D”. A Figura 5.10 apresenta o espectro dos pavimentos analisados em função do nível de textura e comprimento de onda.

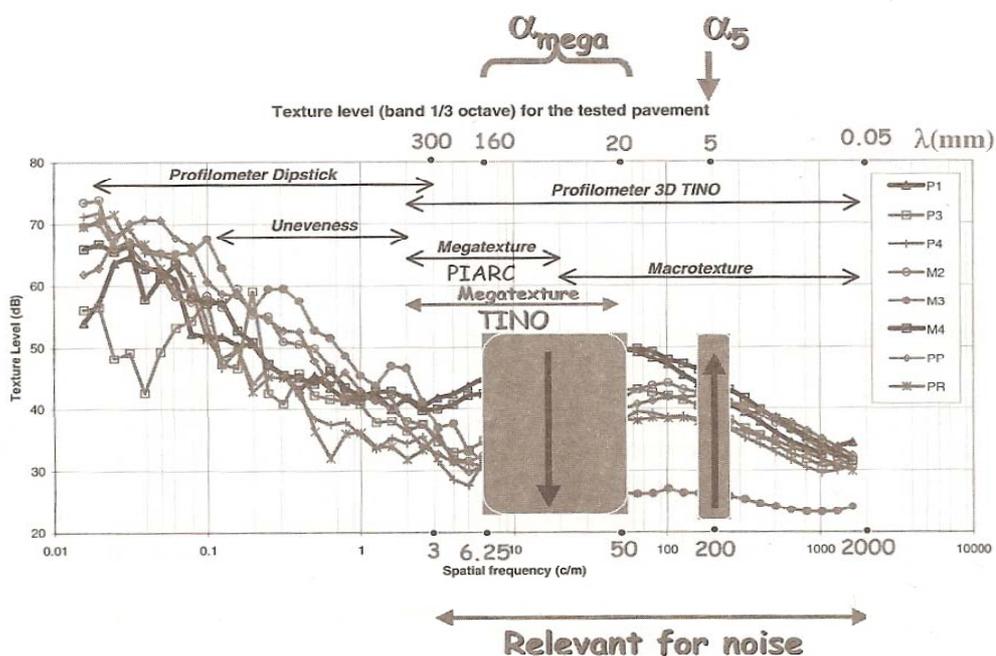


Figura 5.10 – Nível de textura em bandas de 1/3 de oitava para todos os pavimentos em estudo [Domenichini et al., 1999]

Quando se relaciona o comprimento de onda com as frequências e os diferentes tipos de textura, verifica-se que o comprimento de onda compreendido entre 10 e 500 mm (macro e mega-textura) influencia a emissão de ruído de baixas frequências (<1000 Hz para veículos ligeiros e <500 Hz para veículos comerciais) e que os níveis de ruído aumentam visto que a amplitude da textura em esse comprimento de onda aumenta. Por outro lado, o comprimento de onda entre os 0,5 e 10 mm (macro-textura) influencia a emissão do ruído de altas frequências (>1000 Hz) e o nível de ruído decresce quando a amplitude da textura aumenta. Considera-se que este efeito está associado ao mecanismo de bombeamento do ar anteriormente descrito. Esta situação é ilustrada na Figura 5.11 [Domenichi et al., 1999].

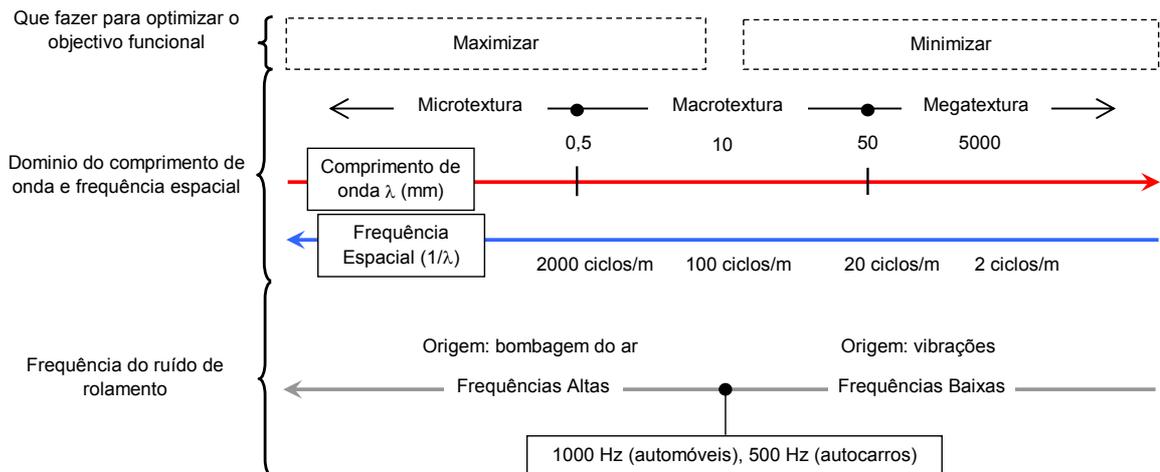


Figura 5.11 – Definição do tipo de textura em função do comprimento de onda e da frequência espacial [Domenichi et al., 1999]

De acordo com os estudos efectuados, a micro-textura tem pouco efeito sobre a redução de ruído. Embora uma superfície polida forneça uma ligação mais forte em termos de aderência, em condições secas, as superfícies polidas devem ser evitadas optando-se sim por materiais resistentes ao polimento [Sandberg, 1996].

Por outro lado, as arestas afiadas, quando comparadas com as arredondadas, causam amplitudes mais elevadas de componentes de alta-frequência. Na escala de comprimentos de onda de 1 a 8 mm (domínio da macro-textura), as amplitudes elevadas significam baixo ruído.

A optimização da macro-textura representa um papel importante na redução de ruído, pelo que há algumas questões principais que devem ser consideradas e optimizadas [Sandberg, 1996]:

Quanto aos veículos ligeiros:

- A macro-textura deve ter amplitudes elevadas na escala de comprimento de ondas de 1-8 mm;
- A macro-textura deve ter amplitudes baixas na escala de comprimento de ondas de 10-50 mm.

Quanto aos veículos pesados:

- A macro-textura deve ter amplitudes elevadas na escala de comprimento de ondas de 0.5-12 mm;
- A macro-textura deve ter amplitudes baixas na escala de comprimento de ondas de 16-50 mm.

Desta maneira, pela escolha do tamanho e forma da granulometria, poderá moldar-se o espectro da textura num grau considerável. Porém, existe um problema, uma vez que há uma inter-correlação (coeficiente de correlação 0,7-0,9) entre a textura e os diferentes

comprimentos de onda, tais como 5 e 50 mm. Isto significa que uma superfície com textura elevada a 50 mm, também a possui geralmente a 5 mm e vice-versa. A dificuldade consiste em forçar a textura para a tornar elevada a 5 mm sem a aumentar também a 50 mm [Sandberg, 1996].

Uma mega-textura rugosa gera ruído de baixa frequência. Em geral, aconselha-se uma mega-textura minimizada, o que pode ser conseguido evitando-se grandes tamanhos de agregados, e conseqüentemente melhorando a macro-textura. Quaisquer outras granulometrias em falta, ou grandes espaços entre a granulometria, poderão causar o aumento da mega-textura. Isto pode ser evitado das seguintes formas:

- A granulometria deve ser de tamanho uniforme e bem compactada;
- Deverá optar-se preferencialmente por partículas com forma cúbica, que é mais facilmente compactável e orientável do que, por exemplo, a granulometria com agregado rolado;
- Se for usada uma granulometria com agregado rolado, a superfície deve ser bem compactada, de forma a que se obtenha uma orientação uniforme [Sandberg, 1996].

Na maioria das superfícies, as alterações da profundidade da textura ocorrem apenas gradualmente, ao longo do tempo. Em revestimentos superficiais podem ocorrer grandes alterações em períodos mais curtos, devido à rápida desagregação dos materiais incrustados, durante os períodos de tempo quente. No entanto, em superfícies betuminosas densas, as alterações são geralmente pequenas e graduais, e resultam da combinação do efeito de vários factores, entre os quais, a desagregação, o fendilhamento e a movimentação dos materiais (exsudação e subida de finos).

Em superfícies de betão de cimento escovado, a perda de textura ocorre devido ao desgaste da argamassa escovada e, em casos mais extremos, ao subsequente desgaste do agregado grosso do betão que tenha ficado exposto à circulação do tráfego [Chandler et al., 2003].

Um outro considerando importante quanto à textura, diz respeito à forma como esta é obtida aquando da aplicação das superfícies de desgaste, em obra. A relação das amplitudes da mega-textura com o ruído, é diferente conforme se trate de superfícies texturadas aleatoriamente ou superfícies com uma textura transversal, como o betão de cimento escovado. A Figura 5.12 ilustra este efeito para uma gama de superfícies identificadas com as texturas transversal ou aleatória [FEHRL, 2006].

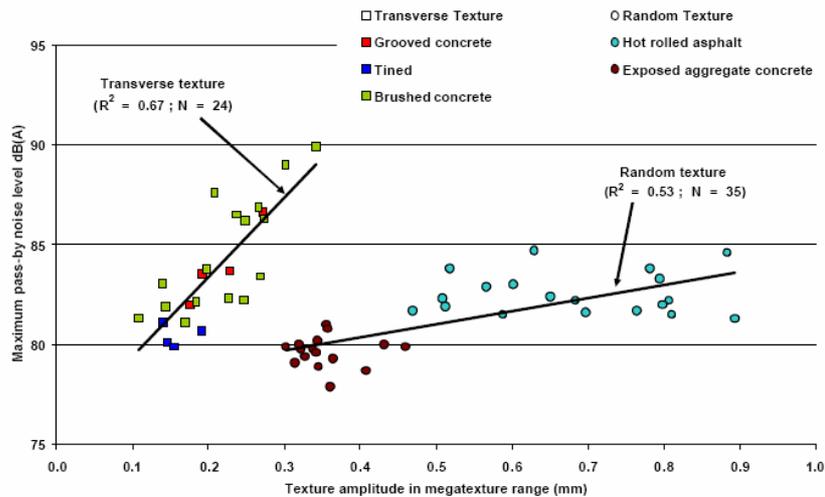


Figura 5.12 – Variação no nível de ruído (SPB) com a amplitude da textura na gama da mega-textura para veículos ligeiros, a uma velocidade de 90 Km/h a 7.5 m [FEHRL, 2006]

Esta figura apresenta os resultados de medidas dos níveis de ruído obtidas a partir do método Estatístico de Passagem (SPB), com veículos ligeiros em estrada de média a alta velocidade. A Figura 5.12 demonstra que quer para a textura aleatória, quer para a transversal, para uma variedade de superfícies tipo, os níveis máximos de ruído estão perfeitamente correlacionados com as amplitudes da textura na gama da mega-textura. As linhas de regressão que surgem através dos dados correspondentes ao método de texturização são muito diferentes, demonstrando que os níveis de ruído das texturas transversais são significativamente mais elevados para uma determinada amplitude do que os das superfícies texturadas aleatoriamente [FEHRL, 2006].

A explicação para este efeito consiste no facto das forças que actuam num pneu em passagem sobre uma textura transversal serem mais sincronizadas através da largura do pneu, do que no caso da textura aleatória, salientando conseqüentemente vibrações mais elevadas no pneu e produzindo mais ruído. Um resultado similar foi obtido no caso de níveis de ruído de veículos pesados.

Os estudos realizados por Sandberg e Descornet (1980) indicam que os comprimentos de onda registados no espectro da textura da superfície podem estar relacionados com características específicas do ruído pneu/pavimento. Aumentar a amplitude de comprimentos de onda longos, tende a aumentar o nível de ruído, ao passo que aumentar a amplitude de textura de comprimento de ondas curto provoca uma redução dos níveis de ruído [Phillips et al., 2003].

6 INFLUÊNCIA DOS PNEUS

6.1 Considerações gerais

A roda é das invenções mais relevantes da humanidade. Desde a época dos antigos romanos, egípcios e sírios que a roda de madeira era utilizada nos seus veículos. O pneu pode ser encarado como uma forma de unir as extremidades de uma roda.

Na sua forma inicial, o pneu consistia num revestimento de madeira sobre a roda, destinado à exposição ao desgaste provocado pela estrada. No túmulo de Tutankhamon surgem referências a um pneu de couro, e as escavações em Pompeia sugerem que as quadrigas romanas utilizavam pneus de ferro [Patterson, 1968].

Contudo, apenas a partir dos meados do século XIX ocorreram uma série de invenções e de experiências, as quais permitiram desenvolver pneus tal como são conhecidos actualmente. As mais importantes encontram-se descritas no Quadro 6.1.

Quadro 6.1 – Principais invenções e experiências relativas à evolução dos pneus

Data	Autor	Descrição (adaptado de [www.inventors.about.com])
1844	Charles Goodyear	Inventou a borracha vulcanizada, posteriormente foi usada nos pneus.
1845	Robert William Thomson	Patenteou uma estrutura circular preenchida por ar comprimido, fixada a uma roda (precursor do pneu pneumático).
1888	John Dunlop	Inventou os pneus pneumáticos ou pneus de ar insuflado (patenteados para pneus de bicicletas).
1891	Edouard Michelin	Inventou o primeiro pneu desmontável para bicicletas.
1895	André Michelin	Primeira pessoa a utilizar pneus pneumáticos num automóvel (sem sucesso).
1903	Litchfield (Comp. Goodyear)	Patenteou o primeiro pneu sem câmara-de-ar (explorado comercialmente a partir de 1954).
1908	Seiberling Frank	Inventou os pneus sulcados os quais impunham uma melhor tracção à estrada.
1910	Companhia B.F. Goodrich	Inventou os pneus com maior durabilidade, adicionando o carbono à borracha.
1911	Philip Strauss	Inventou o primeiro pneu bem sucedido, o qual era a combinação de um pneu e um tubo interno cheio de ar. A companhia de Strauss "Hardman Tire & Rubber Company" introduziu os pneus no mercado.
1937	Goodrich	Inventou os primeiros pneus de borracha sintética feitos de uma substância patenteada chamada Chemigum.

A preocupação com o ruído produzido pelos pneus não é recente. Thomson, em 1845, salientava o reduzido ruído como uma das maiores vantagens da sua invenção. Algumas décadas mais tarde, provavelmente em 1880, a primeira companhia "Noiseless Tyre Co." (*Pneus Silenciosos*) foi a primeira a utilizar pneus de borracha (Índia Rubber J. 1909). O nome sugere que o ruído emitido por veículos de rodas era uma matéria importante [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Desde logo se começou a constatar que os pneus influenciam o ruído. Até há pouco tempo, o ruído produzido pelos pneus era analisado somente enquanto transmitido ao interior do veículo. Contudo, este determina, de uma forma geral, o ruído ambiente produzido pelo tráfego. Actualmente, os construtores de pneus tentam otimizar as características dos pneus de forma a minimizar o ruído de contacto com a superfície dos pavimentos e abordam o desenvolvimento de novos conceitos de pneu com este mesmo objectivo.

Algumas experiências levadas a cabo entre 1988 e 1989 conduziram a um novo conceito de pneu que apresenta a capacidade de se deformar com o peso do carro, transferindo uma pressão uniforme na zona de contacto com a estrada (Figura 6.1 (a)). Porém, de modo a fornecer uma boa drenagem de água na zona de contacto, assim como eliminar os ruídos pneu/pavimento devido aos mecanismos de geração aerodinâmicas, estes pneus foram equipados com uns furos conforme se pode constatar na Figura 6.1 (b).

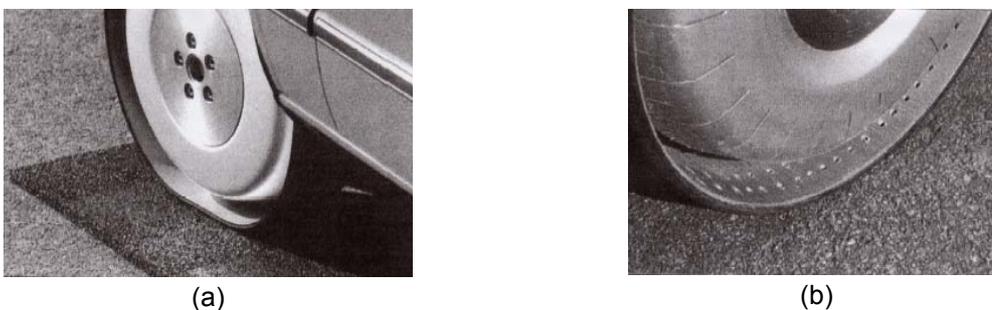


Figura 6.1 – Novos conceitos de pneu (1988/1989) [Sandberg and Ejsmont, 2002]

No início de 1990, foram produzidos e testados novos pneus (com base no conceito anterior) mas com melhores características ao nível da durabilidade. Estes quatro pneus foram testados num Volvo 740 onde se obteve níveis de ruído mais baixos, na ordem dos 7 dB(A) quando comparados com pneus Dunlop D8 e Michelin MXL.

Posteriormente, experiências realizadas entre 1999 e 2001 levaram a um novo conceito graças ao desenvolvimento industrial na obtenção de novos compostos mais resistentes e duráveis. Estes novos pneus são apresentados na Figura 6.2.

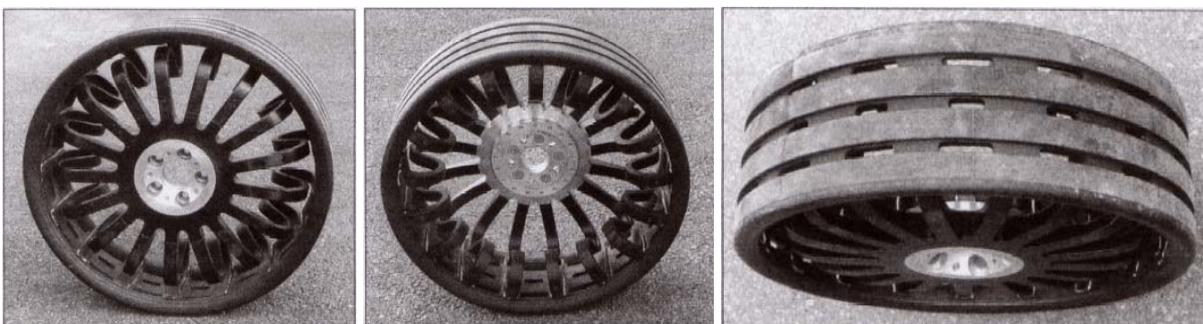


Figura 6.2 – Novos conceitos de pneu (1999 a 2001) [Sandberg and Ejsmont, 2002].

A maioria dos fabricantes de pneus apresenta, actualmente, páginas na internet sobre futuros desenvolvimentos, entre os quais, o ruído é frequentemente referido.

Dada a importância dos pneus na produção de ruído, este capítulo tem por objectivo principal apresentar o efeito das suas características no ruído rodoviário.

O capítulo inicia-se com a descrição detalhada das características dos pneus, dos tipos de pneus, das dimensões e índices usados e do desenho da escultura ou piso do pneu. Estes conceitos são fundamentais para a compreensão do efeito das características dos pneus na produção de ruído. A seguir, apresenta-se a influência que a carga, pressão, diâmetro, largura e desenho da escultura do pneu exercem sobre os níveis sonoros.

6.2 Caracterização dos pneus

No início da época do pneu pneumático, não era possível assegurar um tamanho adequado e constante do pneu, quer em fase de fabrico quer em fase de utilização. Além disso existiam outros problemas, tais como a capacidade de amortecer o contacto com obstáculos e de se deformar, da sua forma inicial curvilínea para uma superfície de contacto plana pneu/pavimento, assim como de obter a rigidez necessária ao desenvolvimento de forças substanciais em qualquer direcção. De forma a preencher estes requisitos foi, e ainda é, necessário implantar uma estrutura denominada carcaça, a qual é constituída por filamentos flexíveis de resistência elevada, embutidos e ligados aos componentes de borracha.

J. B. Dunlop (1888) usou, nos seus primeiros pneus, linho irlandês como material de reforço. Desde então, quase todas as fibras possíveis foram experimentadas ou utilizadas pela indústria de pneus. Na fase inicial, o algodão era o material mais usado, mais tarde utilizou-se o raio (seda artificial), o nylon, o polyester e finalmente o aço, o vidro e a fibra de aramida (“Kevlar”) [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Os actuais pneus pneumáticos contêm muitos componentes de borracha, cada um destinado a contribuir com alguns factores particulares numa área específica do pneu.

Presentemente, o pneu é uma reunião solidária de materiais com propriedades muito diferentes, cuja confecção exige uma grande exactidão. A Figura 6.3 apresenta a constituição actual de um pneu.



Figura 6.3 – Constituição de um pneu [www.michelintransport.com]

A capa de borracha é sintética e muito estanque ao ar. Esta capa encontra-se no interior do pneu e funciona como câmara-de-ar. A carcaça é constituída por cabos finos de fibras têxteis dispostas em ângulos rectos e colados à borracha. Estes cabos são um elemento fundamental da estrutura do pneu e permitem-lhe resistir à pressão. Numa carcaça de pneu de automóvel, existem cerca de 1400 cabos que podem resistir, cada um, a uma força de 15 kg. O talão tem por função transmitir os binários do motor e de travagem da jante à área de contacto com o solo. Os aros de talão servem para fixar o pneu na jante e podem suportar até 1800 kg sem risco de ruptura. Os flancos de borracha macia protegem o pneu contra os choques que poderiam causar danos na carcaça, como pequenos embates contra o passeio, buracos, etc. Uma borracha dura assegura a ligação entre o pneu e a jante. As cintas ou lonas de reforço são feitas com cabos de aço muito finos, mas muito resistentes, são cruzadas obliquamente e coladas, uma sobre a outra. O cruzamento dos seus fios com os da carcaça forma triângulos indeformáveis. Esta disposição (triangulação) assegura com firmeza a parte superior. O piso ou banda de rolamento encontra-se disposto sobre as lonas de reforço. Esta parte do pneu ficará em contacto com a estrada. A mistura que o constitui deve ser aderente em todos os tipos de pavimentos, resistir ao desgaste, à abrasão, e aquecer o menos possível [www.michelintransport.com].

6.2.1 Tipos de pneu

Basicamente existem dois tipos de pneus: pneus diagonais (Figura 6.4) e pneus radiais (Figura 6.5).

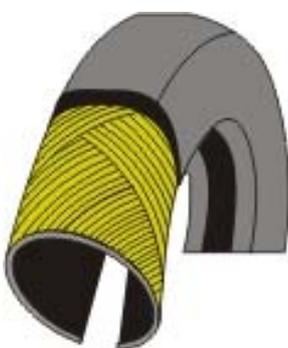


Figura 6.4 – Pneu diagonal
[www.braziltires.com]

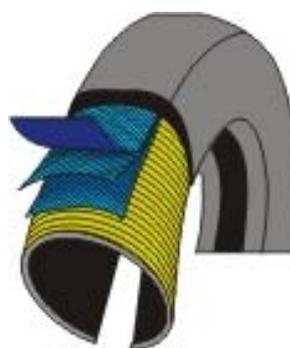


Figura 6.5 – Pneu Radial
[www.braziltires.com]

Os pneus pneumáticos iniciais são designados pneus “*bias ply*”, “*cross by*” ou “*diagonais*” (*pneu de lonas transversas*). As carcaças destes pneus são constituídas por duas ou mais camadas de filamentos paralelos. As camadas adjacentes possuem padrões com ângulos em direcções opostas, apresentando assim o efeito de lonas transversas (“*cross bias*”). O número de lonas sobrepostas forma uma rede, cuja malha é sensivelmente quadrada, e depende do tamanho do pneu e da carga suportada. A sobreposição das camadas é idêntica no topo do pneu e nos flancos (Figura 6.4).

Os pneus radiais foram inventados e produzidos em 1946 pela Michelin. Neste tipo de pneus, os padrões de filamentos na carcaça são semi-radiais ou radialmente dirigidos (ângulo de coroa $\approx 90^\circ$) (Figura 6.5). No topo da carcaça radial existe um cinto composto por, pelo menos, duas camadas com cordas bastante rígidas (ângulo de coroa $\approx 20^\circ - 30^\circ$). Este cinto fornece rigidez ao piso contra distorções na direcção lateral.

O pneu radial tem como vantagens: menor aquecimento; maior durabilidade; melhor aderência; maior eficiência nas travagens e acelerações e economia de combustível.

A principal diferença entre um pneu diagonal e um radial está na sua carcaça, pelo que apresentam um comportamento em curva diferente (Figura 6.6). Além disso, apresentam uma área de contacto com o pavimento (com e sem carga) diferente (Figura 6.7) [www.braziltires.com.br].



Figura 6.6 – Comportamento em curva de um pneu diagonal e de um pneu radial [www.braziltires.com]

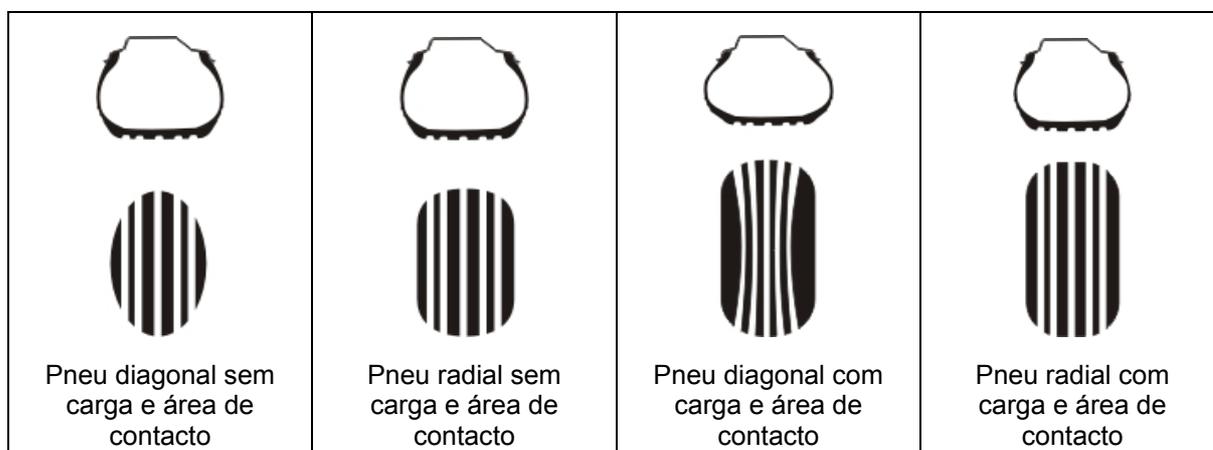


Figura 6.7 – Área de contacto com o pavimento (com e sem carga) de um pneu diagonal e de um pneu radial [www.braziltires.com]

Actualmente, a norma ISO 4223-1:2005 estabelece as seguintes definições de construção dos pneus diagonais e radiais:

- Pneu de estrutura diagonal (diagonal, bias-ply, cross-bias) – pneu em que as cordas das telas que vão de talão a talão são colocadas de maneira a formar ângulos alternados, sensivelmente inferiores a 90° , com o eixo do piso;
- Pneu de estrutura radial – pneu em que as cordas das telas que vão de talão a talão formam com o eixo do piso ângulos, sensivelmente, iguais a 90° e cuja carcaça é fixada por uma cinta circunferencial, formada por duas ou mais camadas de cordas praticamente inextensíveis [NP ISO 4223-1:2005].

6.2.2 Dimensões e índices

Os primeiros pneus para veículos ligeiros e camiões tinham piso bastante estreito e uma relação elevada entre a altura da secção (H) e largura da secção (B) do pneu, de forma a diminuir a resistência do rolamento e oferecer uma elevada folga corpo-estrada. No início do século XX esta relação (H/B) era, muito frequentemente, superior a 100%. No entanto, a evolução dos pneus levou a um aumento da largura dos mesmos assim como, a um aumento do diâmetro da jante, o que implicou a diminuição da relação (H/B) (Figura 6.8). Uma relação (H/B) baixa oferece uma maior aderência à estrada, melhor resposta na condução e maior estabilidade do veículo [Sandberg and Ejsmont, 2002].

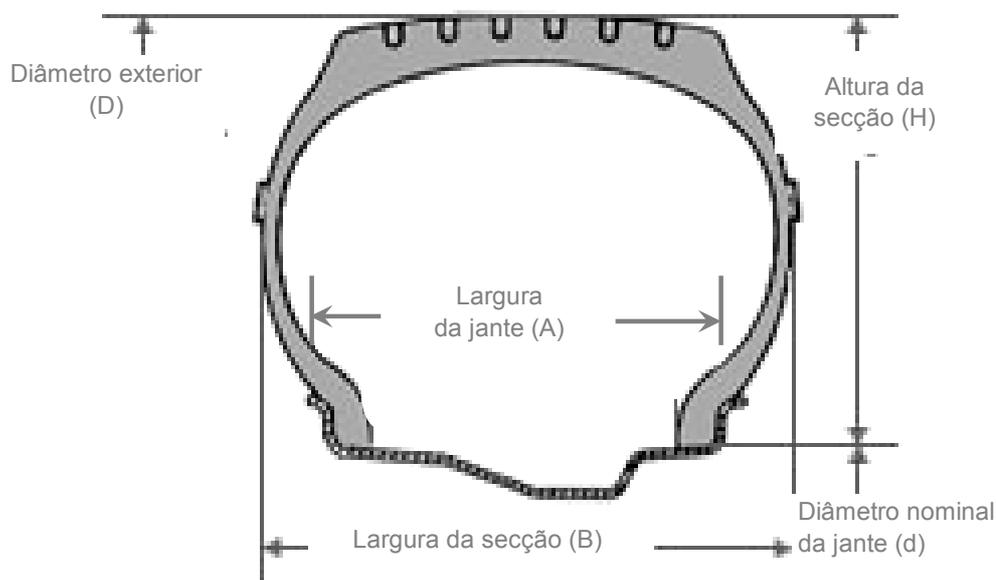


Figura 6.8 – Caracterização do tamanho do pneu [Decreto-Lei n.º 72-C, 2003]

No período de 1960-80 o diâmetro das jantes era geralmente de 13-15", podendo no entanto encontrar-se também diâmetros de 10". Porém, nas últimas décadas, a crescente exigência de travões mais eficientes motivou a uma nova tendência para o uso de jantes com diâmetros maiores. Devido a este facto, o diâmetro das jantes tornou-se um pouco maior, sendo que no início do século XXI muitos veículos passaram a usar jantes de 16" ou 17". Actualmente, a gama de diâmetro inferior que se pode encontrar, situa-se nas 12", não sendo no entanto muito comum.

Em Portugal, o Decreto-Lei n.º 72-C de 14 de Abril de 2003 estabelece e regula as designações aplicadas na caracterização dum pneu, nomeadamente quanto ao tamanho e índices. Na Figura 6.9 apresentam-se os índices que caracterizam um pneu ligeiro ou pesado.

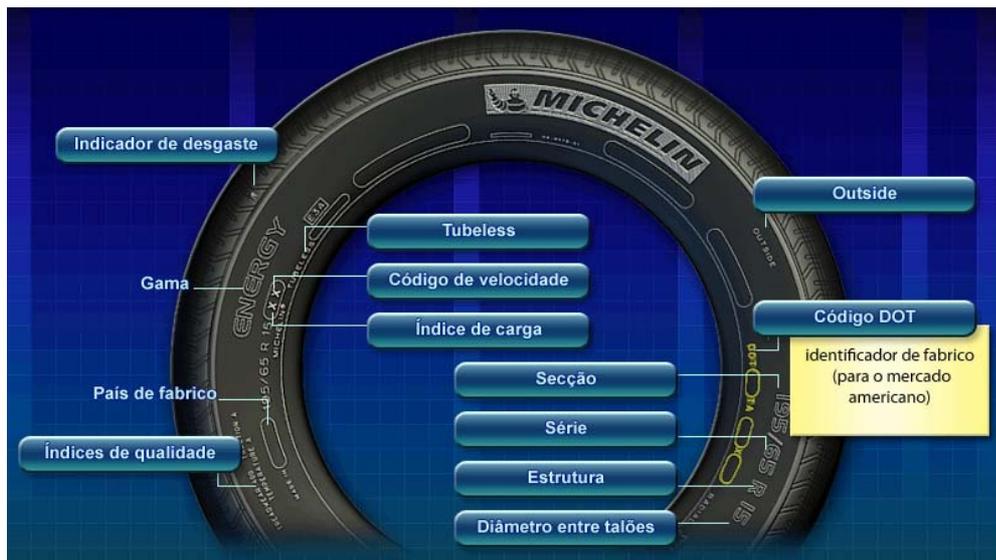


Figura 6.9 – Índices de um pneu [Catálogo Michelin, 2006]

6.2.3 Piso

A nível dos padrões de piso, ocorreram também importantes alterações. Os primeiros pneus apresentavam um padrão suave (sem ranhuras) ou padrões de formas geométricas muito simples. No entanto, no início dos anos trinta, alguns padrões de piso começaram a tornar-se mais intrincados e altamente especializados.

O piso de um pneu é composto por (Figura 6.10):

- Nervura Central: mantém um contacto "circunferencial" do pneu com o piso, confere manobrabilidade e aderência;
- Blocos: proporcionam tracção e travagem;
- Ranhuras do piso ou sulcos: são responsáveis pela drenagem (expulsão) da água e lama;
- Drenos: são ranhuras auxiliares que levam a água para fora da área de contacto do pneu com a superfície, aumentando a aderência em piso molhado;
- Covas: pequenas ranhuras que auxiliam na dispersão do calor do pneu [www.braziltires.com.br e Decreto-Lei n.º 72-C, 2003].



Figura 6.10 – Composição do piso de um pneu [www.braziltires.com.br]

Quando a proporção de sulcos (áreas vazias) for maior relativamente aos blocos (áreas cheias), poderá existir um melhor desempenho em terrenos molhados ou com lama ou areia. Caso contrário, quando a proporção de blocos (áreas cheias) for superior aos sulcos (áreas vazias) existirá um melhor desempenho e aderência em piso de betão betuminoso seco.

6.3 Influência da carga do pneu

A carcaça é a parte do pneu que suporta a carga exercida pelo veículo. Todos os pneus têm uma indicação do índice de carga, que corresponde ao peso máximo suportado sobre cada pneu.

A carga dos veículos pode influenciar o ruído dos veículos, sendo que este também depende do tipo de superfície e do tipo de pneu. Estudos levados a cabo pela Universidade Tecnológica de Viena (TUW) abordaram este aspecto, tendo concluído que o efeito da carga do veículo, combinado com a redução da pressão do pneu, sobre o ruído em passagem, é reduzido e depende do tipo de superfície do pavimento [Pucher et al, 2006].

Nesse estudo, foram testados vários tipos de piso de pneu, de forma a permitir observar a influência da escultura do piso, sob condições de carga e sem carga no ruído produzido. Nos ensaios efectuados com o veículo sem carga, a pressão de ar no pneu situou-se entre 1,9 a 2,1 bars, enquanto que quando o veículo testado se encontrava sob carga, a pressão de ar no pneu se situou entre 1,6 e 1,7 bars. Para a condicionante de carga, os testes foram executados com o veículo a 70% – 90% da carga classificada e/ou determinada. Todas as variações de pneus usadas para os ensaios foram realizadas com pneus de dimensões 175/70 R13 82T.

Na Figura 6.11 apresentam-se os resultados obtidos para o ruído de um veículo com carga e sem carga, para 7 tipos diferentes de piso de pneus e sobre 6 tipos de superfície [Pucher et al., 2006].

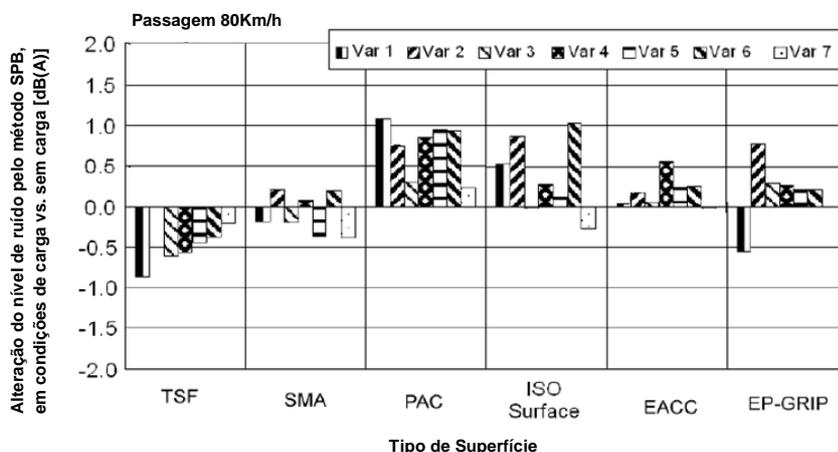


Figura 6.11 – Nível de ruído em passagem em condições de carga vs sem carga [Pucher et al., 2006]

Da análise da figura pode verificar-se que na superfície em *Stone Mastic Asphalt* (SMA) não se verifica qualquer alteração, porém, nas superfícies EP-GRIP, EACC, PAC e ISO há um aumento no ruído até 1,1 dB(A). Em superfícies delgadas (TSF) há uma redução do nível de ruído quando o veículo tem carga.

Roovers (2003) obteve resultados similares em ensaios realizados numa superfície ISO (Quadro 6.2). Como se pode verificar, para uma pressão de pneu constante (1,8 bars), o aumento de ruído no veículo sob carga foi de 1,4 dB(A). No entanto, quando a pressão do pneu foi alterada de 2,4 bars sem carga para 1,8 bars com carga o ruído aumentou de 1,7 dB(A). Os resultados destes dois conjuntos de dados encontram-se em concordância razoável, apresentando um aumento do nível de ruído de 1 a 1,7 dB(A), para um aumento da carga com um decréscimo da pressão do pneu no caso das superfícies ISO [Pucher et al., 2006].

Quadro 6.2 – Influência da pressão e carga do pneu no ruído numa Superfície ISO, obtido pelo método Coast-By dB(A) [Pucher et al., 2006]

Tipo de Pneu e Estado de Utilização	Nível de ruído com carga (1,8 bars)	Nível de ruído sem carga (1,8 bars)	Nível de ruído sem carga (2,4 bars)
Goodyear Eagle NCT 2 175/65 R14T 7000 Km	--	--	71,5
Pirelli P3000 Energy 175/70 R13T 100 Km	72,9	71,5	71,2
Michelin Energy XT-1 175/65 R14T 100 Km	72,0	70,9	--
Pirelli P5000 Drago 195/50 R15V 100 Km	--	72,0	--

6.4 Influência da pressão de ar no pneu

Os pneus suportam o peso do veículo mas na realidade é a pressão do ar dentro dos pneus que suporta esse peso. Quando um pneu apresenta uma pressão excessiva, existe uma tendência para um desgaste maior no centro do pneu, contudo circular com pressões baixas no pneu pode provocar o aquecimento excessivo, e conseqüentemente, a sua destruição prematura pelo que, circular com a pressão correcta em todos os pneus é importante.

A pressão do pneu deve ser sempre verificada com os pneus frios, caso contrário, o calor do ar no interior pode levar a uma indicação errada.

A repartição da pressão na área de contacto exerce um papel essencial a nível da aderência e do ruído. Na Figura 6.12 apresenta-se a influência da repartição da pressão de um pneu

com esculturas idênticas, na zona de contacto, na drenagem de água [www.michelintransport.com].

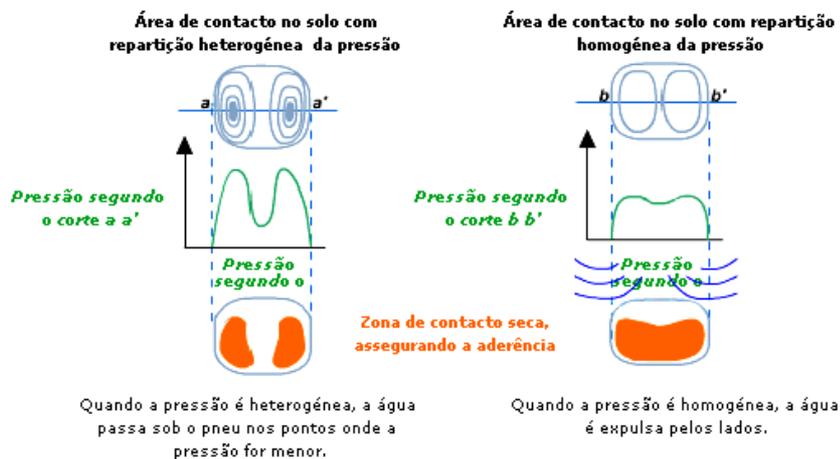


Figura 6.12 – Influência da pressão do ar, no pneu, na drenagem da água [www.michelintransport.com]

O efeito da pressão do ar nos pneus sobre os níveis de ruído obtido pelo método SPB, foi estudado também pela Universidade Tecnológica de Viena (TUW). Neste estudo foram analisados os efeitos do aumento da pressão do ar, da diminuição da pressão do ar e da diminuição da pressão do ar e aumento da carga. Na Figura 6.13 apresenta-se a influência da pressão do ar sobre os níveis de ruído [Pucher et al., 2006].

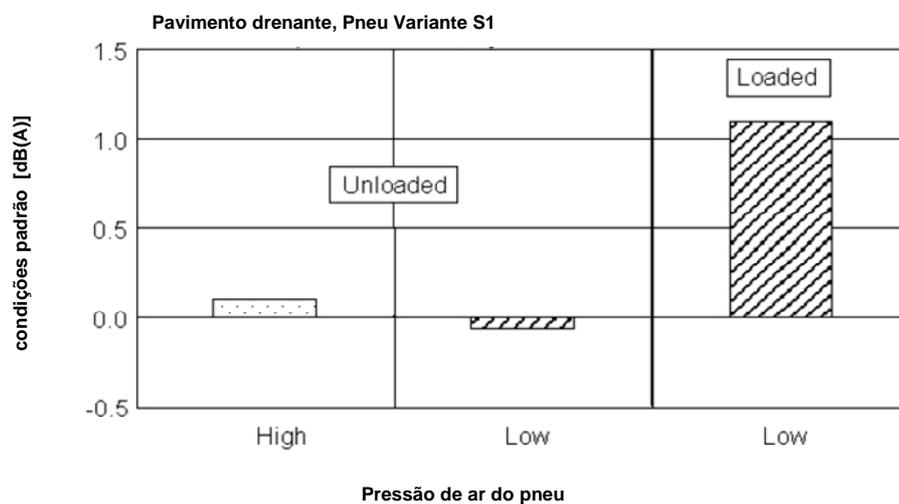


Figura 6.13 – Ruído de um veículo sem carga com uma pressão de ar aumentada e diminuída vs. nível standard e para um veículo com carga [Pucher et al., 2006]

6.5 Influência do diâmetro do pneu

O diâmetro do pneu tem também uma contribuição relevante no ruído pneu/pavimento, podendo influenciar a emissão de ruído através do efeito de pavilhão e através do impacto da escultura do pneu sobre a superfície de pavimento.

Sandberg e Ejsmont (2002) demonstraram que o aumento do diâmetro do pneu leva ao aumento do ruído, quando utilizados pneus de largura inferior a 195 mm. Estes autores referem que tal poderá resultar do facto do efeito de pavilhão se tornar mais eficiente devido à redução do ângulo de ataque (α) (Figura 6.14).

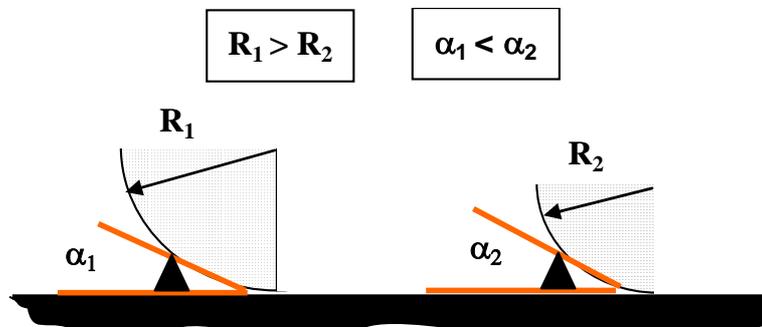


Figura 6.14 – Ângulo de ataque [Sandberg e Ejsmont, 2002]

No entanto, referem também que um ângulo de ataque mais pequeno produz o efeito contrário sobre o ruído do impacto do piso do pneu. Assim, a conclusão que se poderia retirar seria que numa superfície rugosa, em que o impacto do piso teria um efeito maior, o aumento do diâmetro do pneu conduziria a um decréscimo do ruído do pneu. Por outro lado, para superfícies lisas o efeito de impacto do piso do pneu ficaria diminuído e o aumento do diâmetro do pneu poderia conduzir ao aumento do ruído devido à eficiência acrescida do efeito de pavilhão que conduz a um ângulo de ataque mais pequeno [Sandberg e Ejsmont, 2002].

Abbot e Watts (2003), quando aferiam os coeficientes de correlação dos vários parâmetros de pneus, em relação aos níveis de ruído, descobriram que o diâmetro do pneu tinha um coeficiente de correlação ligeiramente negativo para dois tipos de superfícies, *Hot Rolled Asphalt* (HRA) e Betão Betuminoso Poroso (PAC), o que significa que à medida que o diâmetro do pneu aumenta, o nível de ruído diminui [Pucher et al., 2006].

A Figura 6.15 apresenta os resultados de algumas análises à relação entre o diâmetro da jante (que está intimamente relacionado com o diâmetro do pneu) e o nível de ruído sobre uma superfície ISO [Roovers, 2002]. Detectou-se uma pequena correlação positiva entre o diâmetro da jante e o nível de ruído. No entanto, isto poderá dever-se à correlação entre o diâmetro da jante e a largura do pneu, uma vez que geralmente os pneus largos são montados em jantes largas, com uma relação reduzida entre a altura e a largura da secção (relação H/B) [Pucher et al., 2006].

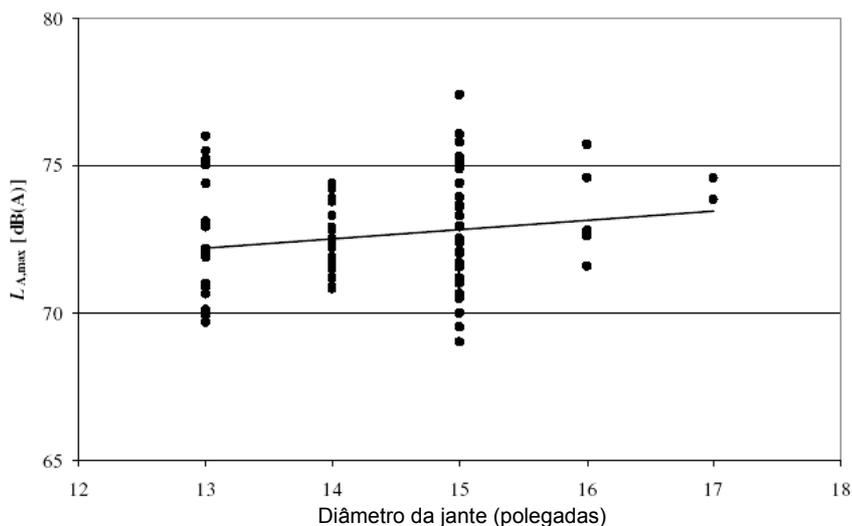


Figura 6.15 – Correlação entre o diâmetro da jante e o nível de ruído sobre uma superfície ISO [Roovers, 2002]

Na Figura 6.16 apresenta-se o efeito geral do diâmetro do pneu em vários veículos e tipos de pneu. De notar que, embora a correlação seja positiva, a dispersão dos resultados é muito grande, atingindo, aproximadamente, 10 dB(A). A largura do pneu também variou nestes resultados, os quais foram obtidos numa superfície em Betão Betuminoso e a uma velocidade constante de 80 Km/h [Pucher et al., 2006].

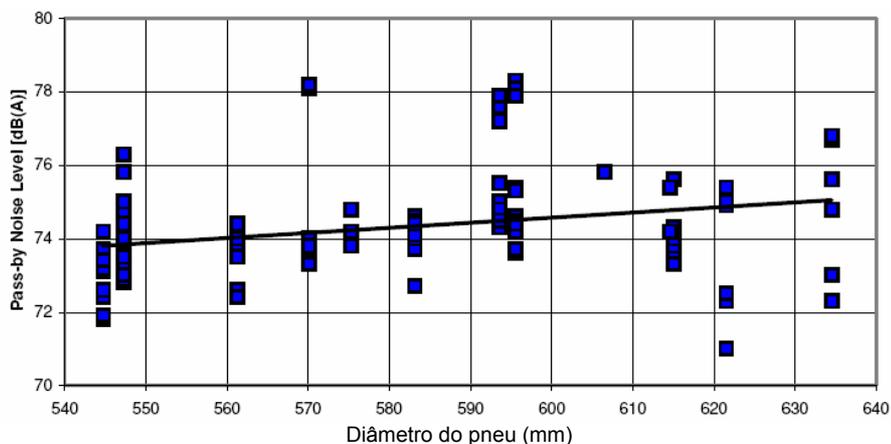


Figura 6.16 – Influência do diâmetro do pneu [Pucher et al., 2006]

Os resultados demonstram que, em alguns casos, o aumento do diâmetro do pneu determina uma ligeira tendência para um aumento do ruído, no entanto a gama de valores dependentes de outros parâmetros dos pneus torna difícil a quantificação dos efeitos causados pelo diâmetro. Os resultados observados tendem a indicar que a influência do diâmetro do pneu é reduzida, já que o efeito sobre o mecanismo de impacto da escultura e sobre o efeito de pavilhão parecem agir de forma inversa, um em relação ao outro, em determinado grau [Pucher et al., 2006].

6.6 Influência da largura do pneu

Diversos estudos têm vindo a ser realizados para determinar a influência das dimensões do pneu no ruído. Um estudo efectuado por Ejsmont em 1982 concluiu que o ruído do pneu aumenta 2,4 dB (A) quando a largura de um pneu passa de 165 mm para 185 mm. Outro estudo efectuado por Storeheier and Sandberg em 1990 determinou que existe um incremento de aproximadamente 5 dB (A) quando a largura do pneu de um carro aumenta de 140 mm para 200 mm. Assim, para os veículos ligeiros, o ruído produzido pelo pneu apresenta um incremento entre 0,2 e 0,4 dB(A) por cada 10 mm de aumento da sua largura. Estas características tendem a produzir níveis mais elevados de ruído irradiado para o exterior pelo pneu [Sandberg, 1996].

A Figura 6.17 ilustra uma relação significativa entre o nível de ruído, em diferentes tipos de pavimentos (*Hot Rolled Asphalt*, *Stone Mastic Asphalt* e *Brushed Concrete Surfaces*) e a largura do pneu [Phillips et al., 2003].

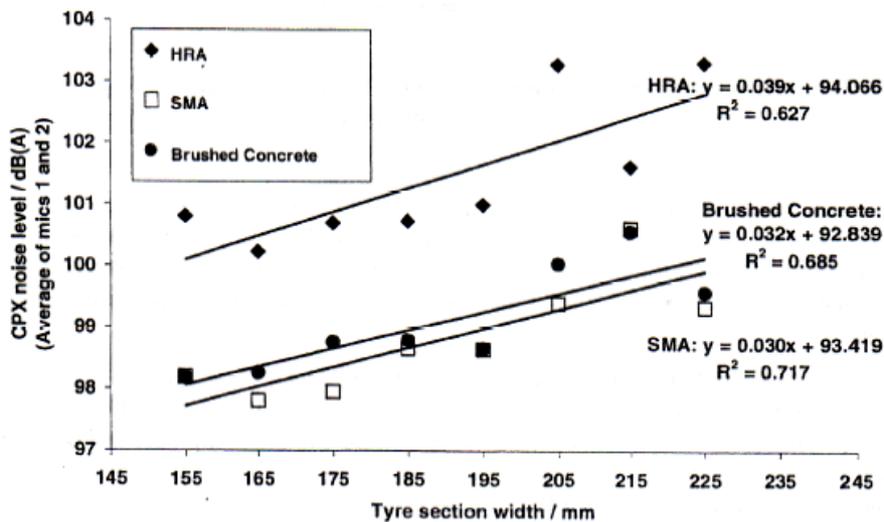


Figura 6.17 – Influência da largura de um pneu nos níveis de ruído, em diferentes pavimentos [Phillips et al., 2003]

Uma redução do ruído em 2 dB(A) para todas as larguras de pneu parece ser tecnologicamente exequível. Contudo, para se atingir uma alteração de mais de 3 dB(A) torna-se necessária uma viragem tecnológica. Naturalmente, a indústria dos pneus encontra-se empenhada em contribuir para a redução do ruído de tráfego em situações em que o ruído de contacto pneu/pavimento é predominante [Saemann E., 2006].

6.7 Influência do desenho da escultura do pneu

Os fabricantes de pneus têm vindo, desde há muitos anos, a efectuar pesquisas no sentido de obter sistemas que cumpram os objectivos da indústria automóvel e que gerem menos ruído. Sendo o objectivo principal da concepção do pneu, o baixo ruído, é hoje em dia possível fabricar pneus que são apenas 1 dB(A) mais ruidosos do que um pneu vazio,

essencialmente através da alteração da escultura e da escolha de componentes adequados [Saemann E., 2006].

O perfil do pneu é um dos parâmetros mais importantes a ser manipulado no controlo do ruído pneu/pavimento. Este influencia, em maior ou menor grau, todos os mecanismos, especialmente quando o pneu está em andamento sobre superfícies de textura lisa.

Cada perfil de piso é constituído por elementos básicos, denominados “segmentos”, os quais são distribuídos em torno da circunferência do pneu. A área ocupada pelo segmento é designada por “pitch” na terminologia anglo-saxónica e pode ser constante para todos os segmentos ou variar consideravelmente.

Geralmente, os segmentos em ambos os lados do pneu estão ligeiramente deslocados. Deslocamento esse que na terminologia anglo-saxónica se convencionou chamar “offset” (Figura 6.18) [Sandberg and Ejsmont, 2002].

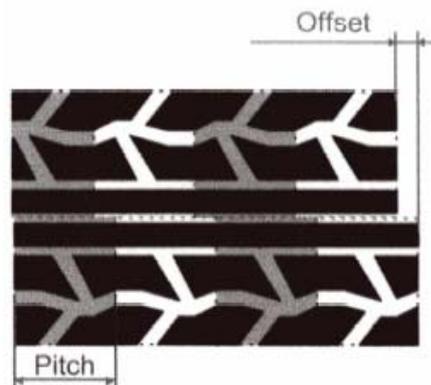


Figura 6.18 – Desenho geral do piso de um pneu [Sandberg and Ejsmont, 2002]

Na forma mais simples, todos os segmentos são idênticos. Verifica-se que, devido ao impacto periódico da escultura sobre a superfície de estrada, os pneus com “pitch” constante geram um ruído muito desagradável.

Uma solução bastante óbvia para o problema de ruído pneu/pavimento, consiste na introdução de um “pitch” variável de segmento. Geralmente os segmentos são dispostos em circunferência para formarem duas a quatro famílias de comprimentos diferentes. Estas mudanças de perfil muitas vezes não resultam numa alteração dos níveis de ruído. Essencialmente, o que produzem é uma distribuição da potência sonora ao longo do espectro de forma, mais ou menos adequada [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Para tornar o ruído mais “agradável” distribui-se aleatoriamente a escultura do piso do pneu.

O Quadro 6.3 apresenta diferentes disposições de segmentos de pneu e principais distribuições aleatórias [Sandberg and Ejsmont, 2002].

Quadro 6.3 – Diferentes disposições de segmentos de pneu e principais distribuições aleatórias [Sandberg and Ejsmont, 2002]

DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA	"PITCH" CONSTANTE	Todos os segmentos têm o mesmo comprimento (sem distribuição aleatória).	
	SINCRÓNICO	Os segmentos têm comprimentos diferentes, sendo a sua ordenação igual à direita e à esquerda do pneu.	
	ASSÍNCRONO	Os segmentos têm comprimentos diferentes, sendo a sua ordenação diferente à direita e à esquerda do pneu.	
SIMETRIA	SIMÉTRICO	Os segmentos no lado direito do pneu são idênticos aos do lado esquerdo, (existindo no entanto um offset, neste caso).	
	ASSIMÉTRICO	Os segmentos no lado esquerdo têm um perfil diferente em relação aos do lado direito.	
DIRECCIONALIDADE	BI-DIRECCIONALIDADE	Os segmentos no lado esquerdo do pneu sofrem uma rotação de 180° em relação aos do lado direito	
	DIRECCIONALIDADE	Os segmentos no lado direito são o espelho dos segmentos no lado esquerdo. Outras propriedades especiais são possíveis como por exemplo lamelas inclinadas	

O bombeamento do ar e a ressonância de ar no sistema tubular, constituídos pela interacção da escultura com a superfície, são mecanismos de geração de ruído pneu/pavimento muito importantes que os projectistas de pavimentos deverão ter em conta.

Uma forma de reduzir o ruído gerado por estes mecanismos é evitar bolsas de ar fechadas, cavidades com saídas estreitas e ranhuras longas sem ramos laterais ventilados. Este requisito está totalmente de acordo com as propriedades de uma boa drenagem de água no perfil do pneu.

A forma ou contorno da marca pneu/pavimento nas margens dianteiras e posteriores, assim como a natureza da simetria da escultura, no que respeita às margens exterior e interior podem influenciar a geração de ruído.

O Quadro 6.4 resume a influência de elementos de perfil simples no ruído pneu/pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002]. A maior parte dos dados de base deste quadro foram obtidos em perfis especialmente produzidos a partir de pneus lisos. As medições foram efectuadas no tambor TUG (*TUG drum facility*) com uma réplica de uma superfície de pavimento em betão betuminoso.

Quadro 6.4 – Influência de elementos de perfil simples no ruído pneu/pavimento [Sandberg and Ejsmont, 2002]

ALTERAÇÕES NO PERFIL DE PNEU		EFEITO			
		SPL de Ponderação A	ESPECTRO DE FREQUÊNCIAS		
			Nível de frequência principal do impacto do perfil	Nível de frequências de "ressonância de ar"	Nível das frequências mais altas (4-16 kHz)
	Aumento da largura das ranhuras 2 - 9 mm 9 - 12mm	↑ ↓	↑ ↓	↑ ↓	↓ ↓
	Diminuição do ângulo das ranhuras (relativamente à direcção do andamento) 90 - 70° 70 - 0°	↓ ●	↓ ↓	↓ ●	● ●
	Adição de ranhuras "em imagem espelho"	●	●	●	↓
	Adição de ranhuras circunferenciais a um perfil de ranhuras transversais	↓	●	↓	↓
	Adição de lamelas	↓ ●	↓	●	●
	Ventilação de bolsas de ar	↓	●	↓	↓
	Eliminação de ranhuras que coincidam com o contorno da marca do pneu	↓	↓	●	●
	Distribuição aleatória do perfil	↓	↓↓	●	●
	Introdução de um "offset" entre o lado esquerdo e o lado direito do perfil ou distribuição aleatória assíncrona	↓	↓	↓	●

Legenda: ↓ ↑ ●
diminuição aumento sem influência

Pelo menos em teoria, pode ser possível otimizar um perfil assimétrico para produzir menos ruído do que um simétrico. Actualmente, poucos perfis de pneus modernos podem

ser considerados inteiramente simétricos, quer no que respeita à direcção da rotação, quer às laterais do pneu.

Na Figura 6.19 é ilustrada a influência das ranhuras transversais e circunferenciais no espectro de ruído. A introdução de ranhuras transversais num pneu liso incrementa em 15 dB os níveis de ruído dentro da gama de frequências de 1,0 a 6,3 kHz. No entanto, a introdução de ranhuras circunferenciais diminui os níveis de ruído, para a mesma gama de frequências, acima dos 5 – 7 dB.

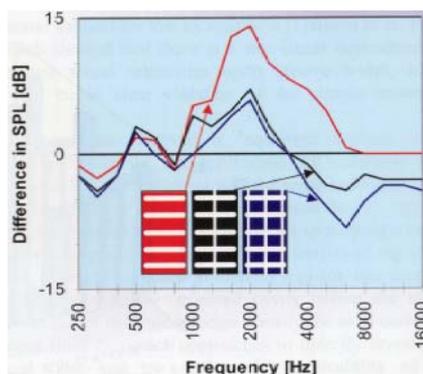


Figura 6.19 – Influência das ranhuras transversais e circunferenciais no espectro do ruído [Sandberg and Ejsmont, 2002]

6.8 Influência das propriedades dos materiais do pneu

As propriedades dos materiais que constituem os pneus também influenciam o nível de ruído. A Universidade Tecnológica de Viena (TWV) estudou o efeito de algumas destas variáveis. O Quadro 6.5 apresenta a variação de parâmetros usada nesse estudo para cada variante de pneu [Pucher et al., 2006].

Quadro 6.5 – Parâmetros para avaliação das propriedades dos materiais dos pneus na produção de ruído [Pucher et al., 2006]

Variante de Pneu	Paredes Laterais Reforçadas	Ângulo de Cinta	Espessura de Cinta	Camadas de Perfil	Espessura da Borracha de Base	Mistura de Base
SA1	Sim	Pneu de ref.	Pneu de ref.	Pneu de ref.	Pneu de ref.	A
SA2	Não	Pneu de ref.	Pneu de ref.	Pneu de ref.+2	Pneu de ref.+1,5	B
SA3	Não	Pneu de ref.+4	Pneu de ref.	Pneu de ref.	Pneu de ref.+1,5	A
SA4	Sim	Pneu de ref.+4	Pneu de ref.	Pneu de ref.+2	Pneu de ref.	B
SA5	Sim	Pneu de ref.+4	Aumentado	Pneu de ref.	Pneu de ref.+1,5	B
SA6	Não	Pneu de ref.+4	Aumentado	Pneu de ref.+2	Pneu de ref.	A
SA7	Não	Pneu de ref.	Aumentado	Pneu de ref.+2	Pneu de ref.	A
SA8	Não	Pneu de ref.+4	Aumentado	Pneu de ref.+2	Pneu de ref.	A
SA9	Sim	Pneu de ref.	Aumentado	Pneu de ref.	Pneu de ref.	B

As alterações são todas comparadas com um pneu de referência de tamanho 195/65 R15 91H [Schwartz, 1998].

As variáveis seleccionadas têm como referência um pneu 195/65 R15 91H. As Variáveis da mistura de base A e B apresentaram vários valores de determinação de dureza, sendo a Variável B de borracha mais dura que a Variável A.

A Figura 6.20 ilustra a forma como as alterações nestas propriedades dos pneus afectaram o ruído sobre vários tipos de superfície. O aumento da espessura da borracha de base foi a que registou uma influência mais importante sobre o nível de ruído. Em todas as superfícies de pavimento, observou-se uma redução de ruído de 0,7 a 2,0 dB(A), sendo que a diferença, foi particularmente notória nas superfícies com texturas mais largas, tais como a EP-GRIP, o *Stone Mastic Asphalt* (SMA) e o *Porous Asphalt Concret* (PAC). O aumento da espessura da cinta resultou num decréscimo de ruído na ordem dos 0,2 a 1,2 dB(A), dependendo do tipo de superfície. O reforço das paredes laterais teve uma influência de cerca de 0,2 a 0,7 dB(A). O aumento da dureza do pneu não resultou em alterações mensuráveis do ruído para os dois valores de dureza de pneu testados [Pucher et al., 2006].

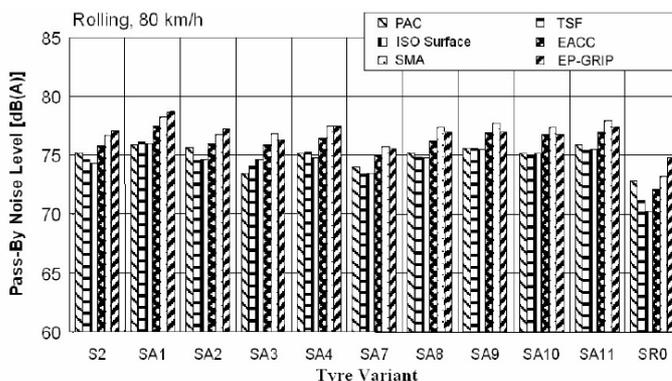


Figura 6.20 – Efeito das propriedades da base de construção dos pneus sobre o ruído em passagem para várias superfícies [Pucher et al., 2006]

Com base nos resultados apresentados na Figura 6.20, comparou-se um pneu hipotético, com propriedades optimizadas (designado variante SAFL) com o pneu de base S2. Os resultados desta comparação para os vários tipos de superfície rodoviária são apresentados na Figura 6.21 [Pucher et al., 2006].

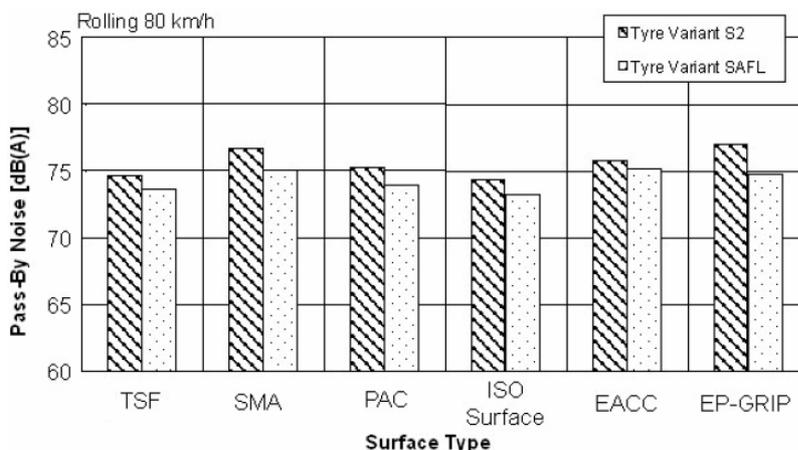


Figura 6.21 – Comparação de um pneu com construção de base optimizada [Pucher et al., 2006]

A Figura 6.21 demonstra que a otimização das propriedades dos materiais constituintes dos pneus pode resultar numa redução de ruído de 0,5 a 2 dB(A), dependendo do tipo de superfície de pavimento, para a gama de valores das propriedades dos materiais utilizados no estudo.

6.9 Influência do pneu no espectro de ruído

As componentes do espectro de ruído do pneu, que variam independentemente das características do pneu e da superfície do pavimento, são passíveis de serem separadas.

Separando os componentes espectrais do ruído do pneu que variam de forma diversa conforme a textura, verifica-se que os componentes de baixa frequência dependem muito menos do tipo de pneu do que os componentes de alta frequência, estes devido às vibrações do pneu e aqueles por estarem relacionados com o padrão de perfil do pneu (Figura 6.22).

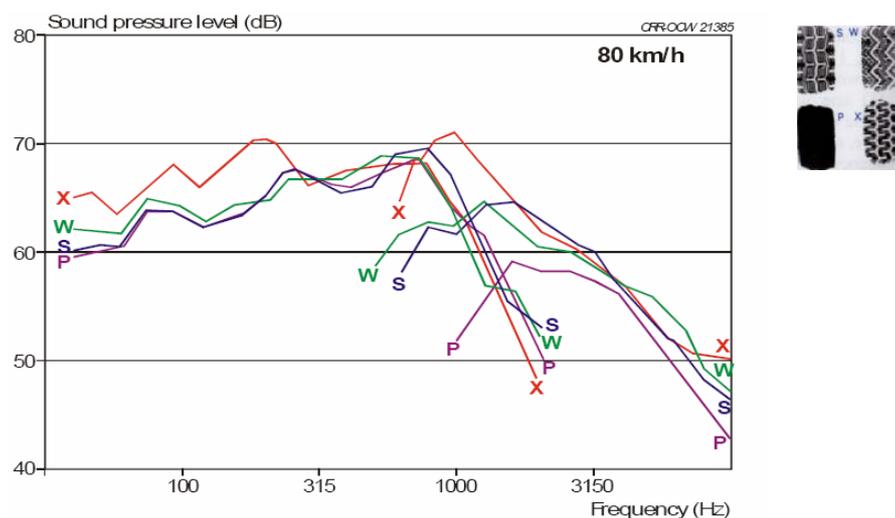


Figura 6.22 – Separação do espectro do ruído do pneu devido às vibrações do pneu (esquerda) e efeitos da escultura do pneu (direita). (X: todas as Estações; S: Verão; W: Inverno; P: Pneu de Referência em Branco da PIARC) [Descornet, 2005]

O primeiro componente é responsável pelo espectro de ruído de baixas frequências (< 1000 Hz) e deve-se às vibrações do pneu causadas pelas irregularidades da superfície, com um comprimento de onda aproximadamente igual à média do raio do pneu/área de contacto com a estrada, isto é, 50-100 mm, o que se encontra dentro da gama da mega-textura. O nível de ruído associado a este tipo de fenómeno é uma função ascendente da amplitude da mega-textura. A fonte de ruído (na banda dos 500-1000 Hz) está próxima do centro da zona de contacto entre o pneu e a superfície.

O segundo componente de ruído pelo contacto pneu/pavimento, fora do veículo, está relacionado com a interacção de fenómenos complexos que ocorrem ao nível dos elementos da escultura do pneu. Estes fenómenos consistem essencialmente no efeito de sucção-e-expulsão de ar nas ranhuras da escultura do pneu (bombeamento do ar) e nas vibrações

tangenciais dos blocos da escultura do pneu (adere e desliza). Estas fontes de ruído são responsáveis pelas altas frequências do espectro (1000 Hz), sendo que o nível de ruído gerado é uma função descendente da amplitude das irregularidades da superfície, com comprimentos de onda na região da largura das ranhuras do pneu, isto é, 2-5 mm, o que se situa dentro da gama da mega-textura. O ruído (na banda de 1000-1500 Hz) provém essencialmente das arestas de contacto dianteiras e traseiras [Descornet, 2005].

O facto de se observar aqui uma relação inversa entre o nível de ruído e a amplitude da textura pode ser explicado assumindo que o fenómeno do bombeamento do ar é predominante. De facto, é fácil entender que o ruído da sucção é aumentado pela área de contacto, que é macia ao nível da escala das ranhuras no perfil do pneu. Uma superfície áspera nessa escala fornece aberturas de escape, isto é, permite a drenagem lateral, que pode limitar as variações da pressão do ar nos interstícios da escultura do pneu.

A permeabilidade do betão betuminoso poroso representa aqui o mesmo papel que a macro-textura das superfícies densas, assegurando uma drenagem de ar vertical, mais do que lateral. Isto resulta numa redução significativa, em comparação com as superfícies betuminosas densas, da emissão do ruído pneu/pavimento, na gama de frequências acima dos 1000 Hz.

A título de exemplo, na Figura 6.23 é ilustrado o espectro de frequência, obtido num estudo efectuado em Indiana, para pneus “Goodyear Aquared” circulando a 72 Km/h sobre três tipos diferentes de superfícies (PFC – Porous Friction Course, SMA – Stone Mastic Asphalt e HMA – Hot Mix Asphalt) [McDaniel and Thornton, 2004].

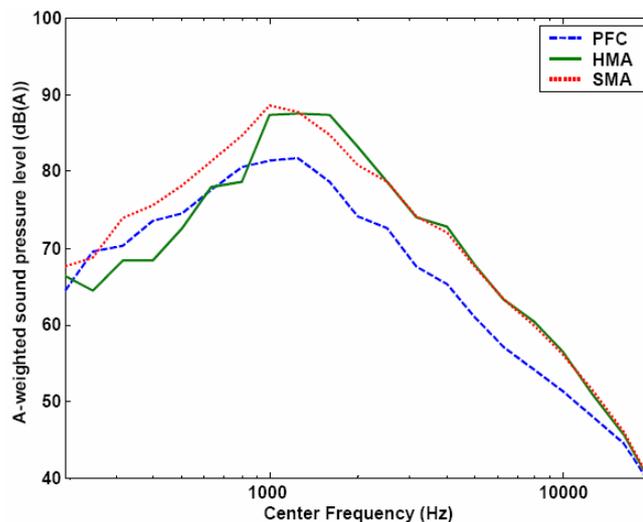


Figura 6.23 – Espectro de frequência em diferentes tipos de pavimentos, para um pneu “Goodyear Aquared” circulando a 72 Km/h [McDaniel and Thornton, 2004]

7 ESTUDO DA EFICÁCIA DOS PAVIMENTOS DRENANTES NA REDUÇÃO DO RUÍDO RODOVIÁRIO

7.1 Considerações gerais

A eficácia pode ser definida como “Comparação entre as realizações, os resultados e/ou os impactos efectivos com os que eram esperados ou estimados. A eficácia pode ser quantificada através de indicadores de realização, de resultado ou de impacto” [www.definicion.org/eficácia]. Tendo como termo de comparação os resultados obtidos num pavimento com camada de desgaste em betão betuminoso clássico, este capítulo tem como objectivo aferir a eficácia dos pavimentos drenantes na redução do ruído rodoviário.

A quantificação dos indicadores de realização baseia-se nos métodos que aplicam as medições nas bermas da estrada – método de passagem estatística (SPB) e no método de passagem controlada (CPB). Estes métodos foram os mais utilizados na comparação de tecnologias de pavimentos “silenciosos”, em vários países [Swanlund, 2005].

Os métodos de ensaio que permitem resultados mais exactos são o CPX (close proximity) e o SPB. Com o primeiro obtém-se melhores resultados no que respeita à quantificação dos componentes do ruído pneu/pavimento, no âmbito do ruído rodoviário. O ensaio do tipo “passagem” (SPB) é considerado o melhor na quantificação do ruído total na berma da estrada ou imediações, sendo que tem em conta todos os tipos de fonte de ruído rodoviário, em vez de apenas os componentes pneu/pavimento [Swanlund, 2005].

Dado que no presente estudo se pretende determinar a eficácia dos pavimentos drenantes face aos pavimentos em betão betuminoso clássico, na redução do ruído rodoviário, em condições secas e molhadas, o Método Estatístico de Passagem (SPB) foi o seleccionado para desenvolver esta investigação complementado com o Método de Ensaio com o Motor Desligado de modo a poder aferir a componente do ruído pneu/pavimento nestas mesmas camadas, no entanto apenas para a condição de superfície seca.

Assim, a seguir descreve-se detalhadamente cada um dos métodos, apresenta-se o local de estudo e caracteriza-se os principais factores que determinam o ruído, nomeadamente o tipo de superfície e a respectiva textura, os veículos de ensaio e as condições meteorológicas.

7.2 Metodologia de estudo

Neste estudo, para a avaliação do ruído de tráfego, nas camadas em estudo, betão betuminoso drenante e “clássico”, adoptou-se a norma ISO 11819-1:1997 “*Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method*”. Esta norma preconiza a medição do nível sonoro máximo para um número, estatisticamente significativo, de passagens para 3 categorias de veículos, a determinadas velocidades, e no mínimo em dois tipos de superfície. Este ensaio foi

realizado em condições secas e molhadas de modo a avaliar a eficácia dos pavimentos drenantes na redução do nível de ruído.

Na avaliação do ruído pneu/pavimento foi aplicado o Decreto-Lei n.º 72-C/2003 *“Método para medir o ruído proveniente do contacto dos pneus com o pavimento”*. Este Decreto estabelece que o veículo de ensaio deve estar equipado com quatro pneus idênticos da mesma classe e tipo e que no mínimo sejam efectuadas 4 medições em cada lado do veículo de ensaio a velocidades inferiores e superiores à velocidade de referência.

Os trechos em análise, com aproximadamente 50 m de extensão, situam-se na auto-estrada A41/IC24, aproximadamente ao Km 8+800, sendo o primeiro em betão betuminoso drenante e o segundo em betão betuminoso “clássico”.

Este segundo trecho foi realizado em obra com o intuito exclusivo de efectuar estes ensaios.

7.2.1 Método estatístico de passagem (SPB)

O método SPB (norma ISO 11819-1:1997) baseia-se na medição dos níveis máximos de pressão sonora, ponderada A, de um número estatístico significativo de veículos individuais em passagem, num trecho específico da estrada para as velocidades do veículo.

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 Figura 7.1;

- 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 (Figura 7.2).

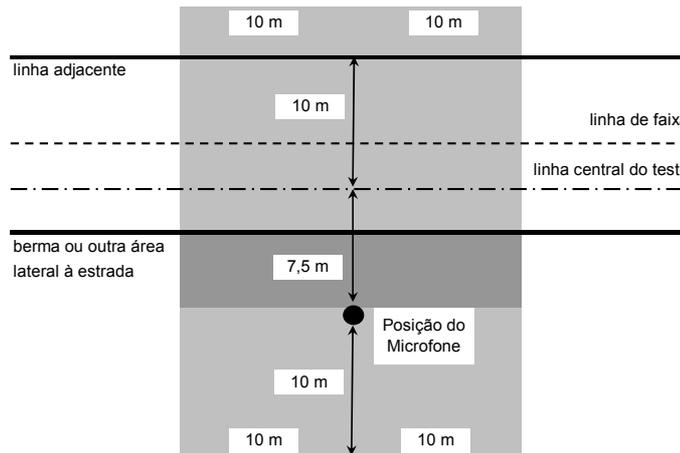


Figura 7.1 – Definição da zona onde não é permitida a existência de quaisquer barreiras de segurança [Norma ISO 11819-1:1997]

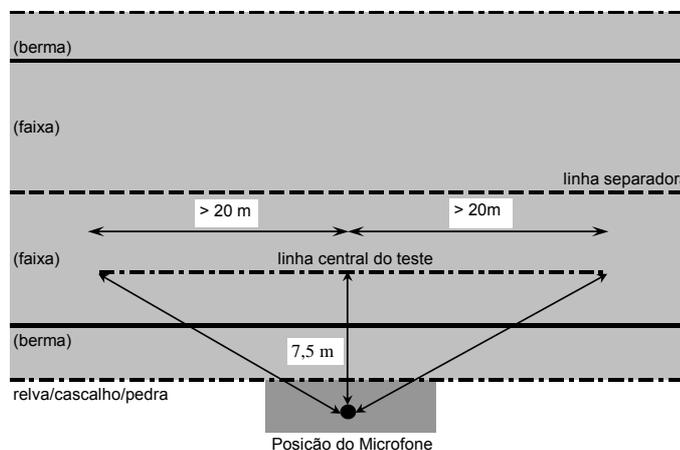


Figura 7.2 – Exigências relativamente à área que o tipo de superfície deverá abranger [Norma ISO 11819-1:1997]

Cada veículo a avaliar é classificado numa das três categorias de veículos: "veículos ligeiros", "veículos pesados de eixo duplo" e "veículos pesados de eixo múltiplo". Não são usadas para esta avaliação outras categorias de veículos, uma vez que não fornecem qualquer informação adicional a respeito da influência da superfície da estrada.

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

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

Para assegurar que não ocorrem erros aleatórios em número inaceitavelmente elevado, deverá medir-se o seguinte número mínimo de veículos, dentro de cada categoria de veículos:

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

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

Somente os veículos que claramente se encaixam em qualquer de uma das categorias descritas deverão ser medidos. Em caso de qualquer dúvida quanto à classificação de um veículo, as medições para esse veículo deverão ser excluídas do estudo.

As medições deverão ser efectuadas somente para veículos individuais em passagem (pass-by) que possam ser claramente distinguidos acusticamente de outro tráfego na estrada.

Adicionalmente, veículos que exibam claramente características de ruído atípicas, tais como as que podem ocorrer devido a um sistema de exaustão defeituoso, ruídos do corpo do veículo ou dispositivos de alarme audíveis deverão ser excluídos das medições. Também os veículos com equipamento auxiliar que emita sons audíveis devem ser rejeitados.

A velocidade do veículo, a temperatura do ar e do pavimento, assim como a velocidade do vento deverão ser observadas.

Para estes parâmetros recomenda-se que:

- A velocidade do veículo deverá ser medida no momento em que o seu ponto médio passa pelo microfone;
- A medição da temperatura do ar deverá ter uma duração de, pelo menos, 15 segundos e caso não seja possível efectuar uma monitorização contínua, a temperatura deverá ser medida em intervalos de 15 minutos;
- A temperatura da superfície de estrada deverá situar-se entre os 5°C e os 50°C;
- A velocidade do vento à altura do microfone não deverá exceder 5 m/s durante as medições.

Aquando do ensaio, deverá optar-se pela posição do microfone conforme se demonstra na Figura 7.3, em função da configuração que a estrada apresenta, 1x2 vias ou 2x2 vias.

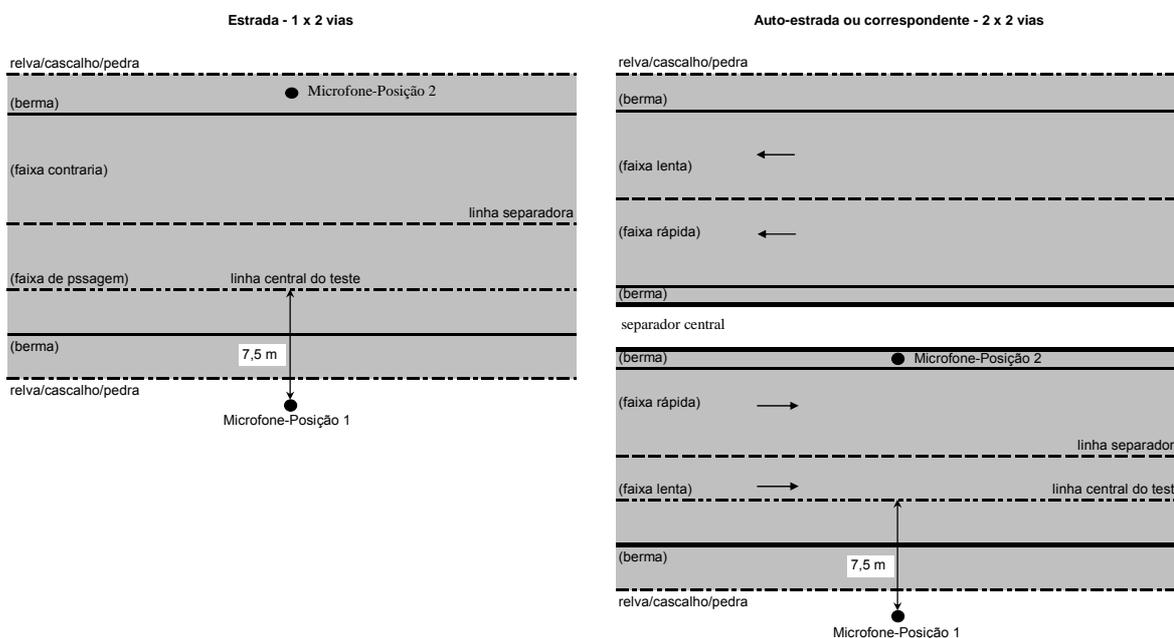


Figura 7.3 – Configurações de estrada típicas e posições do microfone [Norma ISO 11819-1:1997]

O microfone deverá estar localizado $1.2 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}$ acima do plano da faixa de rodagem.

Cada nível sonoro de passagem individual, em conjunto com a velocidade do veículo respectivo é gravado com a finalidade de registar o desempenho acústico de superfícies de estrada.

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

Este índice calcula-se a partir da Equação 7.1 [Norma ISO 11819-1:1997] para os níveis sonoros de cada categoria de veículos, da velocidade de referência e de um factor de ponderação, de acordo com o Quadro 7.1.

Equação 7.1:

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

em que:

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

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

W_1 , W_{2a} e W_{2b} factores preponderantes, equivalentes às proporções assumidas de categorias de veículos no tráfego, de acordo com o Quadro 7.1;

V_1 , V_{2a} e V_{2b} velocidades de referência de categorias individuais de veículos (Km/h), de acordo com o Quadro 7.1 .

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

Quadro 7.1 – Velocidades de referência (V_{ref}) e factores preponderantes (W_x)
[Norma ISO 11819-1:1997]

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

Os valores típicos para os factores preponderantes W_x (W_1 , W_{2a} e W_{2b}) podem variar consideravelmente de lugar para lugar, de país para país e de acordo com a hora do dia ou da noite. Os valores seleccionados no Quadro 7.1 devem representar globalmente a maioria de casos típicos que permitam comparações simples de superfícies de estrada. No entanto, admite-se que em muitos casos poderá preferir-se usar outros factores, talvez nacionalmente adaptados, como suplemento. Porém, os factores preponderantes não padronizados, utilizados, deverão ser sempre devidamente especificados.

O SPBI não é um nível equivalente (Leq) do ruído de tráfego, mas pode ser usado para descrever a influência relativa da superfície de estrada em tais níveis. O índice não pode ser usado para estimativa dos efeitos da velocidade.

7.2.2 Método de ensaio com o motor desligado

No método de ensaio dos níveis das emissões sonoras de pneu em estrada – ensaio com o motor desligado (Decreto-Lei n.º 72-C/2003) – é possível determinar o nível de ruído emitido por um conjunto de pneus colocados num veículo de ensaio a rodar a alta velocidade numa estrada com uma superfície específica. O nível máximo de pressão sonora deve ser registado com o veículo a rodar com o motor desligado, utilizando microfones.

O local de ensaio deve ser constituído por uma parte central rodeada por uma área de ensaio praticamente plana. O trecho onde são efectuadas as medições deve ser plano; a superfície de ensaio deve estar limpa para todas as medições e não deve ser artificialmente arrefecida no decurso ou antes dos ensaios.

A pista de ensaio deve ser concebida de modo a permitir atingir condições de campo acústico livre. Estas condições consideram-se cumpridas se não existirem grandes objectos reflectores de som, tais como cercas, rochedos, pontes ou construções num raio de 50 m em torno do trecho de medição.

Ao projectar o trecho de ensaio, é importante assegurar, como requisito mínimo, que a área percorrida pelos veículos que rodam na faixa de ensaio seja revestida com o material de ensaio especificado, com margens adequadas para permitir uma condução prática e segura, o que exige que a pista tenha, pelo menos, 3 m de largura e se prolongue, no mínimo, 10 m para além das linhas AA' e BB', em cada extremidade (Figura 7.4). A Figura 7.4 mostra em planta o terreno de ensaio adequado e indica a área mínima que deve ser pavimentada e compactada mecanicamente com o material de revestimento especificado.

As medições têm de ser efectuadas de ambos os lados do veículo, para o que se podem utilizar dois microfones colocados um de cada lado da pista.

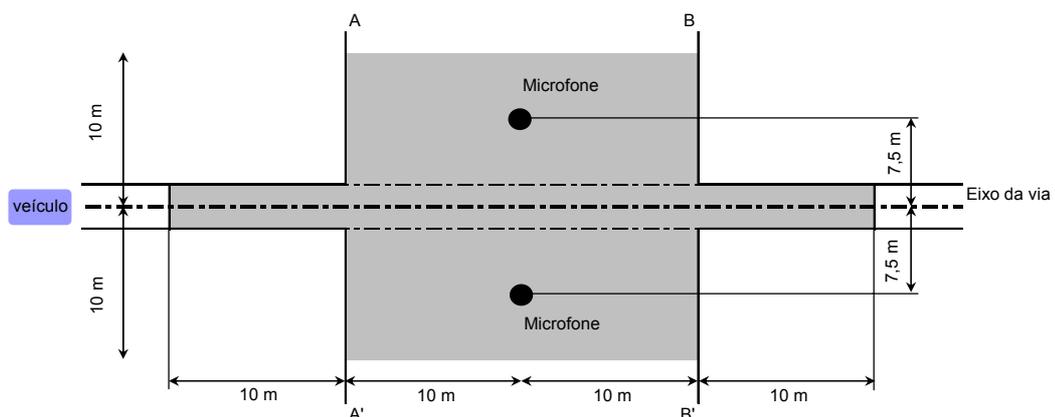


Figura 7.4 – Requisitos mínimos para o terreno de ensaio (a parte sombreada é a área de ensaio) [Decreto-Lei n.º 72-C/2003]

O veículo de ensaio deve ser um veículo e estar equipado com quatro pneus em rodados simples em apenas dois eixos. A distância entre os dois eixos equipados com os pneus de

ensaio deve ser inferior a 3,50 m no caso dos pneus da classe C1 e inferior a 5 m no caso dos pneus das classes C2 e C3.

Para assegurar que o ruído dos pneus não seja afectado de modo significativo pela concepção do veículo de ensaio, estabelecem-se os seguintes requisitos e fazem-se as seguintes recomendações e/ou requisitos:

- Não devem ser instaladas palas ou outros dispositivos antiprojecção;
- Não é permitido colocar ou manter, na proximidade imediata das jantes ou dos pneus, elementos que possam absorver o som emitido;
- O alinhamento das rodas (convergência, divergência e cambamento) deve respeitar integralmente as recomendações do fabricante do veículo;
- Não pode ser colocado material adicional para absorver o ruído nos arcos das rodas, nem por baixo do quadro;
- A suspensão deve estar em condições que não dêem origem a uma redução anormal da distância em relação ao solo com o veículo carregado de acordo com os requisitos de ensaio. Os sistemas de regulação do nível da carroçaria, se existirem, devem estar ajustados de forma a proporcionar durante o ensaio uma distância em relação ao solo que seja normal para o veículo sem carga.

Para evitar ruídos parasitas recomenda-se:

- A desmontagem ou modificação dos componentes do veículo que possam contribuir para o ruído de fundo do mesmo;
- Durante o ensaio deve-se verificar se os travões estão bem libertados, de modo a não provocarem ruídos;
- Deve-se igualmente verificar se as ventoinhas eléctricas de arrefecimento não estão em funcionamento;
- As janelas do veículo e o tecto de abrir devem estar fechados durante o ensaio.

Relativamente aos pneus, devem ser instalados no veículo de ensaio quatro pneus idênticos do mesmo tipo e gama, devem ter sido rodados antes do ensaio e aquecidos antes do início do mesmo.

As velocidades do veículo de ensaio devem estar incluídas na gama:

- De 70 a 90 Km/h, para os pneus da classe C1 e da classe C2;
- De 60 a 80 Km/h, para os pneus da classe C3.

A medição não deve ser considerada válida se for registada uma discrepância anormal entre o valor máximo e os outros valores obtidos.

A velocidade de referência (V_{ref}) para a determinação do resultado final será:

- 80 Km/h, para os pneus da classe C1 e da classe C2;
- 70 Km/h, para os pneus da classe C3.

Aquando da realização do ensaio, o veículo deve ser conduzido em linha recta sobre o trecho de estudo de AA' para BB', de modo que o plano longitudinal médio do veículo esteja tão próximo quanto possível da linha CC', como se mostra na Figura 7.5.

Quando a extremidade dianteira do veículo de ensaio alcançar a linha AA', o condutor do veículo já deve ter colocado a alavanca de velocidades na posição neutra e desligado o motor. Se o veículo de ensaio emitir um ruído anormal (por exemplo, ventoinha, auto-ignição) durante a medição o ensaio deve ser repetido.

O nível sonoro máximo expresso em decibéis ponderados A [dB(A)] deve ser medido até à primeira casa decimal enquanto o veículo está a rodar com o motor desligado entre as linhas AA' e BB'. Este valor constituirá o resultado da medição.

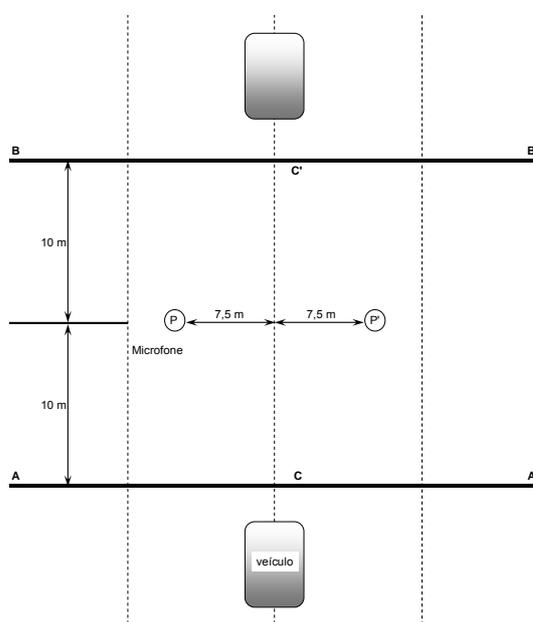


Figura 7.5 – Posição dos microfones e dos veículos para a realização dos ensaios [Decreto-Lei n.º 72-C/2003]

Devem ser efectuadas, pelo menos, quatro medições em cada lado do veículo de ensaio a velocidades inferiores à velocidade de referência e, pelo menos, quatro medições a velocidades superiores à velocidade de referência.

O microfone ou os microfones deverão ser colocados a uma distância de $7,5 \text{ m} \pm 0,05 \text{ m}$ da linha de referência CC' da pista (Figura 7.5) e $1,2 \text{ m} \pm 0,02 \text{ m}$ acima do solo.

O nível de ruído pneu/pavimento L_R (não corrigido quanto à temperatura), expresso em dB(A), será determinado através de uma análise de regressão de acordo com as Equações 7.2 a 7.5 [Decreto-Lei n.º 72-C/2003]:

Equação 7.2:

$$L_R = \bar{L} - a \cdot \bar{v}$$

em que:

L_R é o nível de ruído pneu/pavimento expresso em dB(A);

\bar{L} é o valor médio dos níveis sonoros L_i , medidos em dB(A);

a é o declive da linha de regressão em dB(A);

\bar{v} é o valor médio dos logaritmos das velocidades v_i (Km/h).

Equação 7.3:

$$\bar{L} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i$$

em que:

n é o número de medições ($n \geq 16$)

L_i é o valor dos níveis sonoros, medidos em dB(A).

Equação 7.4:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i$$

Equação 7.5:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})(L_i - \bar{L})}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}$$

No caso dos pneus da classe C2, o resultado final deve ser corrigido para a temperatura de referência da superfície de ensaio. Aos pneus da classe C3 não se aplicará qualquer correcção de temperatura.

As medições não devem ser efectuadas se a temperatura ambiente for inferior a 5°C ou superior a 40°C ou se a temperatura da superfície de ensaio for inferior a 5°C ou superior a 50°C.

Igualmente não deverão ser realizados ensaios se a velocidade do vento à altura do microfone exceder 5 m/s.

7.3 Localização do trecho de estudo

O local escolhido para o presente estudo foi o lanço A41/IC24 Alfena – Ermida, integrado na Concessão Scut do Grande Porto. Este lanço, aquando da realização dos ensaios não se encontrava aberto ao tráfego, pelo que possibilitou o controlo das viaturas na realização dos ensaios. A selecção do local para efectuar os ensaios teve por base as condições mínimas

exigidas pelas normas no que diz respeito à extensão, inclinação e inexistência de grandes superfícies reflectoras.

Deste modo, foram considerados dois trechos consecutivos, um com camada de desgaste em betão betuminoso drenante e outro com camada de desgaste em betão betuminoso clássico, conforme apresentado na planta de localização (Figura 7.6).

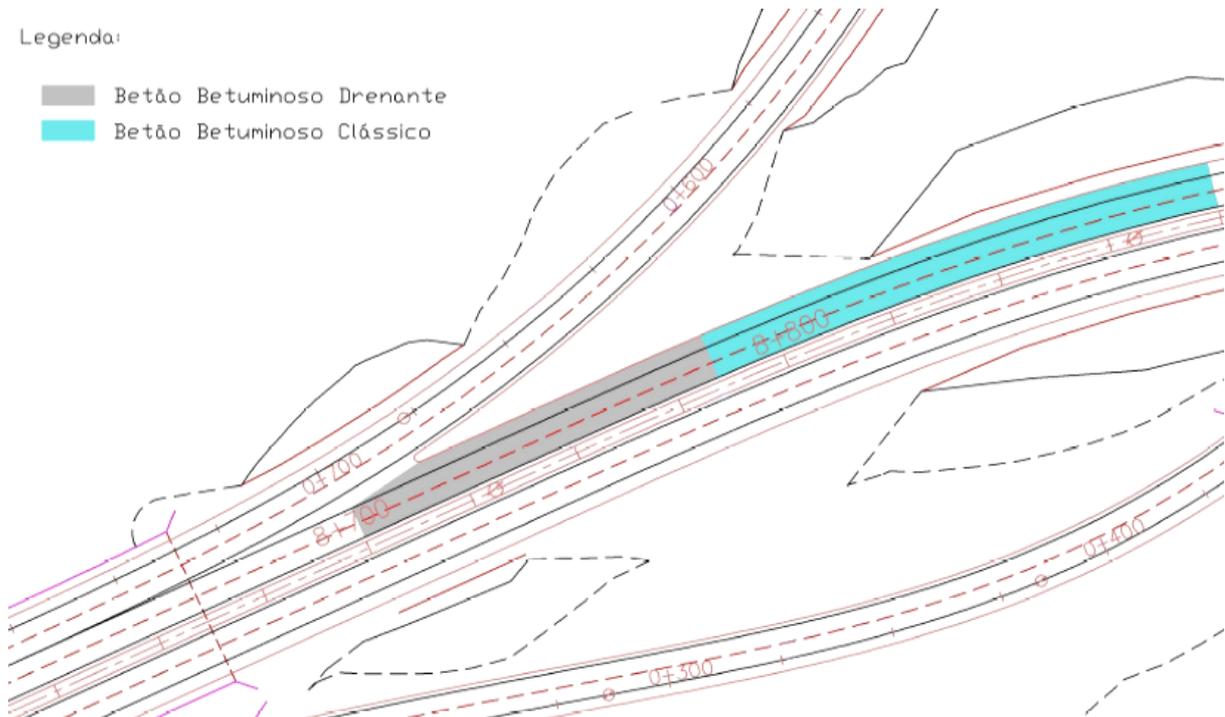


Figura 7.6 – Localização dos trechos de ensaio

7.4 Caracterização da camada de desgaste

Em Portugal, os tipos de camadas de desgaste mais aplicadas em pavimentos rodoviários são as camadas em betão betuminoso, betão betuminoso drenante, os revestimentos superficiais e em alguns casos betão de cimento. Nas auto-estradas, as camadas em betão betuminoso e betão betuminoso drenante são as que mais prevalecem.

A formulação ou estudo de composição de uma mistura betuminosa envolve métodos empíricos, analíticos e racionais, sendo os métodos empíricos de uso mais generalizado. No grupo dos métodos empíricos inclui-se o Método de Marshall, mais usado em Portugal e em todo o mundo. As misturas betuminosas são constituídas geralmente por um conjunto de materiais granulares doseados e misturados numa central a frio ou a quente, continua ou descontínua, com uma quantidade de ligante previamente determinada. Depois de misturados, esses materiais são transportados, espalhados e compactados, sob determinadas regras construtivas, constituindo uma camada de pavimento.

Em termos gerais, são exigidas às misturas betuminosas características tais como: estabilidade, durabilidade, flexibilidade, resistência à fadiga, aderência, impermeabilidade e trabalhabilidade. As características físicas e mecânicas necessárias para que os agregados possam ser integrados nas camadas de pavimentos rodoviários bem como, os fusos granulométricos, são habitualmente expressas nos Cadernos de Encargos.

Entre essas características destaca-se a dimensão do agregado, a porosidade, a percentagem de betume e a textura, uma vez que, não só influenciam o comportamento acústico como a resistência à derrapagem e ao rolamento e a durabilidade das camadas superficiais.

A seguir faz-se a caracterização das camadas de desgaste em estudo: camada em betão betuminoso clássico e camada drenante.

7.4.1 Caracterização do betão betuminoso clássico

Conforme referido no Capítulo 4, a granulometria e o índice de vazios que compõe uma camada de desgaste desempenham um papel significativo no que respeita ao desempenho da estrada quanto ao nível de ruído produzido.

O Caderno de Encargos da Concessão Scut do Grande Porto, estabelece que a granulometria da mistura de agregados para a composição de um betão betuminoso deve obedecer ao fuso apresentado no Quadro 7.2.

Quadro 7.2 – Fuso granulométrico para camadas em betão betuminoso

Peneiros ASTM		% de Material Passado
16.0 mm	5/8 "	100
12.5 mm	1/2 "	80 - 88
10.0 mm	3/8 "	66 - 76
5.00 mm	n.º 4	43 - 55
2.00 mm	n.º 10	25 - 40
0.425 mm	n.º 40	10 - 18
0.180 mm	n.º 80	7 - 13
0.075 mm	n.º 200	5 - 9

Estabelece ainda, que a porosidade esteja compreendida entre os 4 e 6%. Os cálculos da porosidade devem ser efectuados com base na baridade máxima teórica, determinada pelo método do picnómetro de vácuo para a percentagem óptima de betume da mistura em estudo [ASTM D 2041, 2003].

Tendo em consideração o estabelecido no Caderno de Encargos e na Norma NP 142 (1968), que preconiza o ensaio Marshall, foi elaborado um estudo para este sub-lanço onde

se determinou que a formulação a aplicar para proceder ao fabrico da mistura em betão betuminoso seria a seguinte:

- Gravelha 6/16 mm 45,5 %
- Pó de britagem 0/5 mm 47,5 %
- Cal Hidráulica 1,9 %
- Betume 35/50 5,1 %

A análise dos dados de controlo da qualidade determina a recolha duma amostra de betuminoso para posterior caracterização laboratorial. Assim, procedeu-se à recolha do material e posterior análise obtendo-se a curva granulométrica apresentada na Figura 7.7.

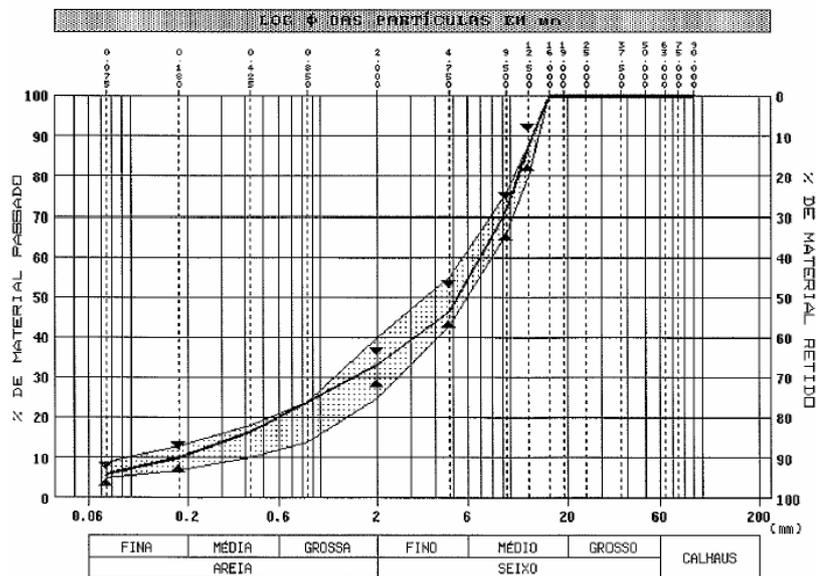


Figura 7.7 – Curva granulométrica da camada em betão betuminoso

Relativamente aos restantes parâmetros caracterizadores da constituição da camada, destacamos os seguintes:

- Baridade da mistura betuminosa 2,36 g/cm³
- Baridade da máxima teórica 2,48 g/cm³
- Percentagem de betume 5,2%
- Porosidade (percentagem volumétrica de vazios) 4,8%

7.4.2 Caracterização do betão betuminoso drenante

No caso das camadas em betão betuminoso drenante, o Caderno de Encargos da Concessão Scut do Grande Porto estabelece que a granulometria da mistura de agregados para a composição de um betão betuminoso drenante deve obedecer ao seguinte fuso, Quadro 7.3.

Quadro 7.3 – Fuso granulométrico para camadas em betão betuminoso drenante

Peneiros ASTM		% de Material Passado
19.0 mm	3/4 "	100
12.5 mm	1/2 "	80 - 100
9.5 mm	3/8 "	50 - 80
4.75 mm	n.º 4	15 - 30
2.00 mm	n.º 10	10 - 22
0.850 mm	n.º 20	6 - 13
0.075 mm	n.º 200	3 - 6

Estabelece ainda, que a percentagem mínima de betume modificado seja de 4% e a porosidade esteja compreendida entre os 22 e 30%.

Para a definição da fórmula de trabalho deste tipo de camadas, recorreu-se de igual modo à Norma Portuguesa NP 142 (1968) que preconiza o ensaio Marshall e ao Estudo Cântabro [NLT-352/86]. A formulação que se obteve para a fabricação da mistura betuminosa foi a seguinte:

- Gravelha 7/15 mm 78,3 %
- Pó de britagem 0/4 mm 14,4 %
- Cal Hidráulica 2,8 %
- Betume PB 1.5 4,5 %

A recolha do material e respectiva análise laboratorial, para o controlo da qualidade, determinou a curva granulométrica apresentada na Figura 7.8.

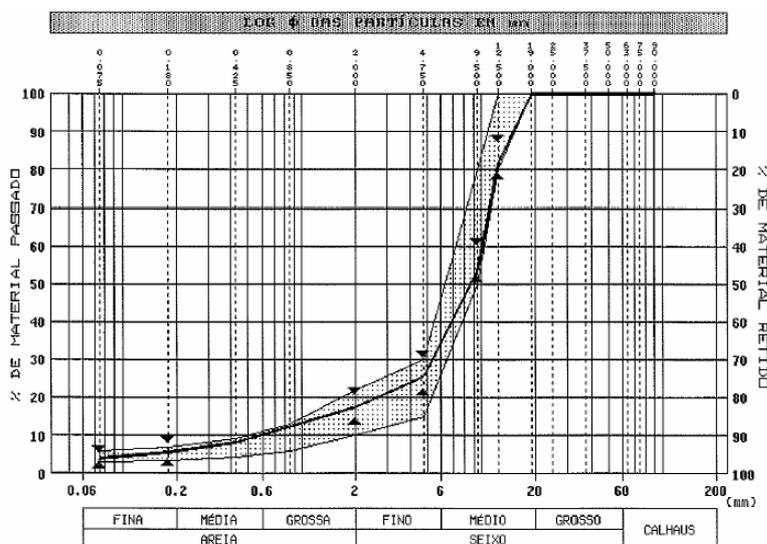


Figura 7.8 – Curva granulométrica da camada em betão betuminoso drenante

Relativamente aos restantes parâmetros caracterizadores da constituição da camada, destacamos os seguintes:

- Baridade da mistura betuminosa 2,00 g/cm³
- Baridade da máxima teórica 2,50 g/cm³
- Percentagem de betume 4,6%
- Porosidade (percentagem volumétrica de vazios) 22%

Da análise da Figura 7.8, constata-se que a dimensão máxima do inerte é elevada, face à pesquisa realizada sobre outros pavimentos silenciosos, assim como o índice de vazios é reduzido, pelo que poderá esperar-se uma redução do ruído inferior ao que este tipo de mistura pode proporcionar.

A elaboração de ambas as misturas foi realizada numa central de betuminoso a quente e descontínua – INTRAME UM 260.

7.5 Caracterização da textura

Conforme referido no capítulo 5.2 são diversos os métodos disponíveis para a caracterização da textura.

Neste estudo, para as camadas em betão betuminoso clássico e em betão betuminoso drenante, a caracterização da textura foi efectuada com recurso a três métodos:

- Método da Mancha de Areia;
- Pêndulo Britânico;
- Perfilómetro a laser – Texscan.

Para determinar a profundidade da textura pelo método da mancha de areia e a resistência ao rolamento com o pêndulo britânico foram efectuadas medições em 3 pontos pertencentes à mesma secção transversal da estrada e distantes entre si de 12,5 m, em 8 secções inseridas nos trechos de estudo.

Para determinação da profundidade da textura através do perfilómetro a laser, foram recolhidos 6 tarolos: 3 da camada em betão betuminoso tradicional e 3 da camada em betão betuminoso drenante. Estes tarolos foram transportados para o laboratório e submetidos ao ensaio através do equipamento Texscan.

Os ensaios da mancha de areia e pêndulo britânico foram realizados de acordo com o estabelecido nas normas NLT-335/87 e ASTM E303-93.

O ensaio realizado com o perfilómetro a laser baseou-se no projecto de norma ISO/CD 13473-4 para a determinação da profundidade média da textura e na norma ISO 13493-1 (1997) para a definição do espectro de textura.

O método da mancha de areia, estabelecido na Norma NLT-335/87, compreendeu os seguintes passos fundamentais:

1. Efectuou-se uma limpeza da superfície, num raio de 25 cm;
2. Encheu-se 1 recipiente com 25.000 mm³ de areia de forma a ficar compactada;
3. Verteu-se a areia, no trecho de ensaio, em forma de superfície cónica;
4. Espalhou-se a areia através de movimentos rotativos, suaves e sem pressão até conseguir uma superfície plana aproximadamente circular;
5. Finalmente, mediu-se com um compasso o círculo de areia e com uma régua obteve-se o raio médio do círculo (Figura 7.9).



Figura 7.9 – Ensaio da mancha de areia

No ensaio do pêndulo britânico:

1. Preparou-se o aparelho para o ensaio, de acordo com o estabelecido na Norma ASTM E303-93;
2. Verteu-se água em quantidade suficiente para cobrir completamente a área a ensaiar;
3. Fez-se oscilar o pêndulo quatro vezes, registando-se apenas as 3 alturas obtidas (Figura 7.10).



Figura 7.10 – Ensaio do pêndulo britânico

No ensaio com o perfilómetro a laser Texscan, procedeu-se da seguinte forma:

1. Recolha dos tarolos;
2. Nivelamento da superfície dos tarolos;

3. Obtenção do perfil tridimensional da superfície;
4. Análise dos resultados.

7.5.1 Mancha de areia e pêndulo britânico

No Quadro 7.4 são indicados os valores obtidos na caracterização da textura na camada em betão betuminoso clássico para os ensaios da Mancha de Areia e Pêndulo Britânico e na Figura 7.11 apresenta-se o aspecto da mesma superfície.

Quadro 7.4 – Resultados do ensaio da mancha de areia e pêndulo britânico na camada em betão betuminoso clássico

Mancha de Areia					Pêndulo Britânico				
Pk.	Dist. Eixo	Diâmetro da mancha (mm)	Altura de Areia (HS)	Valor de C. E.	Pk.	Dist. Eixo	Leitura (m)	Coeficiente de resist. ao deslizamento	
								Leitura	Valor de C. E.
8+800	9,00	200	0,8	> 0,6	8+800	10,00	70	0,70	0,55
8+800	6,50	195	0,8		8+800	6,25	80	0,80	
8+800	2,75	190	0,9		8+800	2,75	75	0,75	
8+812,5	9,00	192	0,9		8+812,5	10,00	80	0,80	
8+812,5	6,50	198	0,8		8+812,5	6,25	80	0,80	
8+812,5	2,75	210	0,7		8+812,5	2,75	80	0,80	
8+825	9,00	195	0,8		8+825	10,00	70	0,70	
8+825	6,50	195	0,8		8+825	6,25	75	0,75	
8+825	2,75	197	0,8		8+825	2,75	75	0,75	
8+837,5	9,00	196	0,8		8+837,5	10,00	75	0,75	
8+837,5	6,50	185	0,9		8+837,5	6,25	75	0,75	
8+837,5	2,75	190	0,9		8+837,5	2,75	80	0,80	
8+850	9,00	187	0,9		8+850	10,00	70	0,70	
8+850	6,50	195	0,8		8+850	6,25	70	0,70	
8+850	2,75	199	0,8		8+850	2,75	70	0,70	
8+862,5	9,00	195	0,8		8+862,5	10,00	70	0,70	
8+862,5	6,50	184	0,9		8+862,5	6,25	70	0,70	
8+862,5	2,75	183	1,0		8+862,5	2,75	65	0,65	
8+775	9,00	188	0,9		8+775	10,00	65	0,65	
8+775	6,50	193	0,9		8+775	6,25	70	0,70	
8+775	2,75	198	0,8	8+775	2,75	65	0,65		
8+887,5	9,00	198	0,8	8+887,5	10,00	70	0,70		
8+887,5	6,50	195	0,8	8+887,5	6,25	65	0,65		
8+887,5	2,75	190	0,9	8+887,5	2,75	65	0,65		
			Média	0,9				Média	0,7
			Desvio Padrão	0,05				Desvio Padrão	0,05

Tendo em conta que se trata de uma camada em betão betuminoso clássico, verifica-se que os valores obtidos para a profundidade da textura estão inseridos num intervalo de 0,7 e 1,0 mm. Quanto aos valores obtidos para o coeficiente de resistência ao rolamento, estão inseridos num intervalo de 0,65 a 0,80 BPN (British Number Pendulum). Todos estes valores são superiores aos mínimos estipulados no Caderno de Encargos.



Figura 7.11 – Aspecto da superfície em betão betuminoso

Atendendo ao facto de que todos os limites dos ensaios de caracterização da superfície do pavimento preconizados no Caderno de Encargos são respeitados e que este tipo de mistura é usado frequentemente pode considerar-se que a superfície em estudo é tomada como referência.

No Quadro 7.5 apresentam-se os valores obtidos na caracterização da textura na camada em betão betuminoso drenante para os ensaios da Mancha de Areia e Pêndulo Britânico e na Figura 7.12 mostra-se o aspecto da superfície em betão betuminoso drenante.



Figura 7.12 – Aspecto da superfície em betão betuminoso drenante

Quadro 7.5 – Resultados do ensaio da mancha de areia e pêndulo britânico na camada em betão betuminoso drenante

Mancha de Areia					Pêndulo Britânico				
Pk.	Dist. Eixo	Diâmetro da mancha (mm)	Altura de Areia (HS)	Valor de C. E.	Pk.	Dist. Eixo	Leitura (m)	Coeficiente de resist. ao deslizamento	
								Leitura	Valor de C. E.
8+700	8,50	145	1,5	> 1,2	8+700	10,00	65	0,65	0,55
8+700	4,75	150	1,4		8+700	6,25	65	0,65	
8+700	2,75	146	1,5		8+700	2,75	65	0,65	
8+712,5	8,50	142	1,6		8+712,5	10,00	70	0,70	
8+712,5	4,75	148	1,5		8+712,5	6,25	60	0,60	
8+712,5	2,75	146	1,5		8+712,5	2,75	70	0,70	
8+725	8,50	139	1,6		8+725	10,00	60	0,60	
8+725	4,75	142	1,6		8+725	6,25	65	0,65	
8+725	2,75	145	1,5		8+725	2,75	65	0,65	
8+737,5	8,50	152	1,4		8+737,5	10,00	65	0,65	
8+737,5	4,75	160	1,2		8+737,5	6,25	65	0,65	
8+737,5	2,75	156	1,3		8+737,5	2,75	65	0,65	
8+750	8,50	150	1,4		8+750	10,00	70	0,70	
8+750	4,75	142	1,6		8+750	6,25	65	0,65	
8+750	2,75	150	1,4		8+750	2,75	65	0,65	
8+762,5	8,50	144	1,5		8+762,5	10,00	65	0,65	
8+762,5	4,75	156	1,3		8+762,5	6,25	70	0,70	
8+762,5	2,75	145	1,5		8+762,5	2,75	65	0,65	
8+775	8,50	146	1,5		8+775	10,00	65	0,65	
8+775	4,75	150	1,4		8+775	6,25	70	0,70	
8+775	2,75	146	1,5		8+775	2,75	65	0,65	
8+787,5	8,50	140	1,6		8+787,5	10,00	65	0,65	
8+787,5	4,75	156	1,3		8+787,5	6,25	60	0,60	
8+787,5	2,75	148	1,5		8+787,5	2,75	65	0,65	
Média			1,5		Média			0,7	
Desvio Padrão			0,11		Desvio Padrão			0,03	

Da análise aos valores obtidos pode constatar-se que o intervalo para profundidade da textura esta compreendido entre 1,2 a 1,6 mm. Estes valores, naturalmente, são superiores aos obtidos na mistura betuminosa clássica, visto tratar-se de uma mistura porosa. Quanto aos valores obtidos para o atrito ou coeficiente de resistência ao rolamento, compreendidos entre 0,60 e 0,70 BPN, indiciam um atrito suficiente. No entanto, após a abertura ao tráfego, estes valores sofrem pequenas alterações devido à esfoliação da película de betume. Além disso, após alguns anos de funcionamento os vazios começam a ser colmatados o que traduz numa perda das propriedades drenantes e acústicas. Os valores obtidos estão inseridos dentro dos valores estipulados no Caderno de Encargos.

Foi ainda realizada, em contínuo, a medição do coeficiente de atrito ao longo de todo o pavimento betão betuminoso drenante do sublanço, incluindo o trecho drenante em estudo. Esta medição foi efectuada em período diurno e com tempo seco, com recurso ao aparelho Grip Tester GT55, tendo-se registado os valores obtidos em troços de 10 m. Estes valores situaram-se no intervalo 0,5 e 0,7 e apresentam-se em conformidade com o estabelecido no Manual de Controlo da Qualidade (valores superiores a 0,4).

Em complemento, o resultado obtido para o IRI (International Roughness Index) na totalidade do lanço foi de “muito bom”.

Relativamente à permeabilidade, o valor médio obtido para o tempo de escoamento, segundo a Norma NLT 327/88 (“Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS”), para o trecho em estudo foi de 13,4 segundos, valor reduzido para este tipo de pavimentos.

7.5.2 Perfilómetro a laser Texscan

O perfilómetro a laser Texscan é um equipamento que permite registar uma imagem tridimensional da superfície do pavimento, obtida a partir de uma malha de pontos distanciados entre si de 0,3 mm. Na Figura 7.13 (a) e (b) apresenta-se, como exemplo, a imagem obtida e a fotografia correspondente de dois provetes. O provete A foi retirado da camada em betão betuminoso drenante e o provete F da camada em betão betuminoso clássico. No Anexo II, mostra-se o aspecto da superfície dos restantes provetes.

Para a determinação da profundidade foi adoptado um plano de nível que passa pelo ponto mais baixo da malha registada.

Uma vez que não existe normalização para levantamentos da superfície a três dimensões, adaptou-se ao caso em estudo a norma ISSO 13473-1(1997), preconizada para a determinação da profundidade média da textura a partir de perfis da superfície obtidos através de lasers pontuais. Assim, para a determinação da profundidade média da textura recorreu-se à seguinte Equação 7.6:

Equação 7.6:

$$PMT = \frac{N_1 + N_2}{2} - N_m$$

em que:

PMT é a profundidade média da textura (mm);

N_1 é o nível do pico de metade da amostra (mm);

N_2 é o nível do pico da outra metade da amostra (mm);

N_m é o nível médio da amostra total (mm).

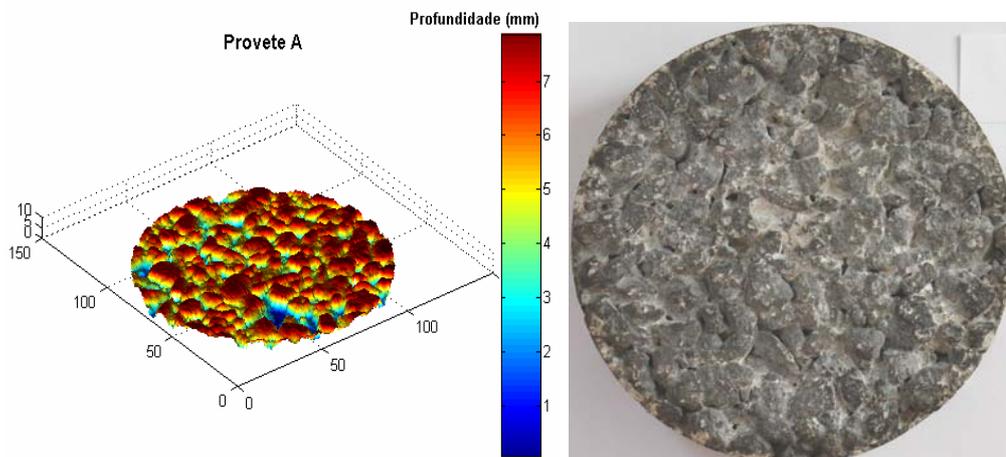


Figura 7.13 (a) – Aspecto da superfície: provete A - betão betuminoso drenante

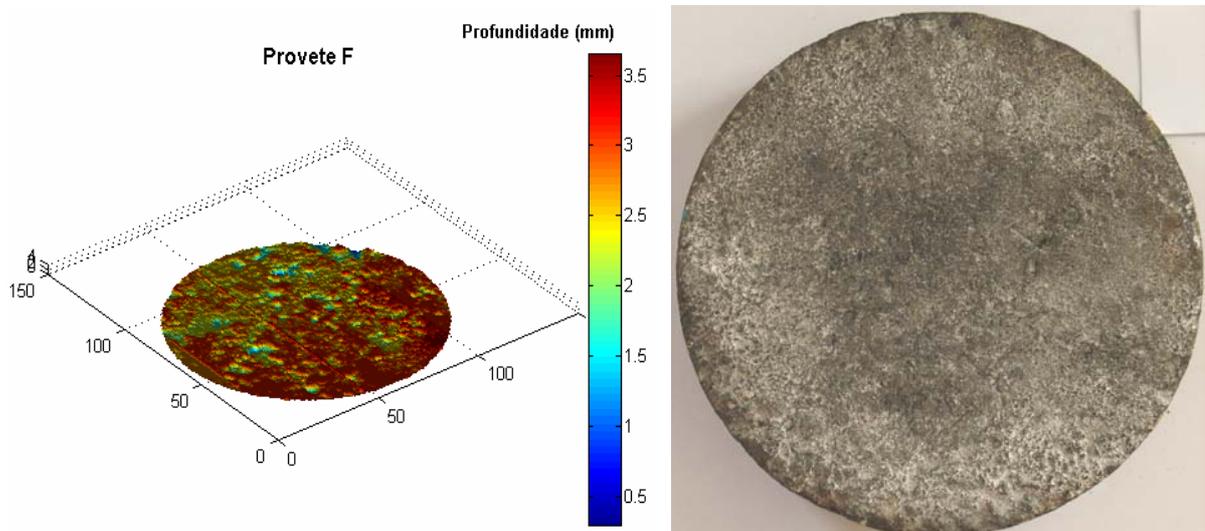


Figura 7.13 (b) – Aspecto da superfície: Provet F - betão betuminoso clássico

A norma ISO 13473-1(1997) preconiza, também, o ajuste da profundidade média da textura, de forma a que os valores obtidos com um perfilómetro a laser sejam comparáveis com os obtidos pelo método da mancha de areia (Equação 7.7).

Equação 7.7:

$$PET = 0,2 + 0,8 \times PMT$$

em que:

PET é a profundidade estimada da textura (mm);

PMT é a profundidade média da textura (mm).

Como o equipamento Texscan é um protótipo que está a ser desenvolvido no âmbito deste trabalho, não foi possível em tempo útil estabelecer a relação entre a PMT e a PET. No entanto, em laboratório determinou-se a altura de areia em cada provete extraído. Os resultados obtidos foram muito próximos dos apresentados no Quadro 7.6 para a PET, em particular dos provetes em betão betuminoso drenante.

Quadro 7.6 – Profundidade média da textura obtida através do Texscan

Provete	A	B	C	D	E	F
PMT	2,48	2,66	2,74	2,48	0,69	1,17
PET	2,19	2,32	2,39	2,19	0,75	1,14

A profundidade estimada da textura é, neste caso, significativamente superior à apresentada nos Quadros 7.4 e 7.5. O facto dos provetes terem sido retirados da berma, por isso com

qualidade inferior relativamente ao material colocado em plena via, é uma possível explicação para esta discrepância de resultados.

Todavia, a utilização deste equipamento permite a análise do espectro da textura. Neste sentido, foi desenvolvido um software de análise do espectro da textura através do programa MATLAB®, baseado no projecto de especificação técnica ISO/DTS 13473-4 "*Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 4: Spectral analysis of surface profiles*".

O procedimento de cálculo é similar aos procedimentos usados em processamento de sinal, consistindo nas seguintes fases:

- aplicação de um filtro anti-réplicas;
- abertura da janela de Hamming;
- aplicação da transformada de Fourier;
- determinação da densidade de potencia espectral;
- determinação do nível de textura por bandas de 1/3 de oitava.

Para além do espectro de textura, também é possível estudar a distribuição dos pontos registados em função da frequência. No Anexo III apresenta-se o número de pontos da amostra em função da frequência e no Anexo IV o nível de textura em função da frequência, para os seis provetes. Na Figura 7.14 apresenta-se os resultados obtidos apenas para os provetes A e F, uma vez que a relação número de pontos/frequência e nível de textura/frequência é semelhante entre provetes extraídos do mesmo tipo de camada.

Como se pode observar, a mistura em betão betuminoso drenante (proвете A) concentra o maior número de pontos em torno da frequência de 1,5 Hz, enquanto que a mistura em betão betuminoso clássico (proвете F) apresenta um máximo na frequência de 1,0 Hz, seguindo-se uma redução acentuada do número de pontos.

As diferenças relativas ao nível de textura são menos perceptíveis, uma vez que o andamento do nível de textura em função da frequência é muito próximo. No entanto, o nível de textura da mistura em betão betuminoso drenante é superior ao do betão betuminoso cerca de 5 dB, nas frequências inferiores a 2 Hz. Consequentemente, o aumento do nível de textura nas frequências inferiores a 2 Hz pode conduzir a uma redução do nível de ruído. Esta redução pode traduzir-se pelo desfasamento da concentração de pontos para frequências superiores.

Contudo, estas conclusões devem ser verificadas através da análise do espectro de textura e do ruído associado, produzido pela passagem dos veículos, noutras misturas betuminosas.

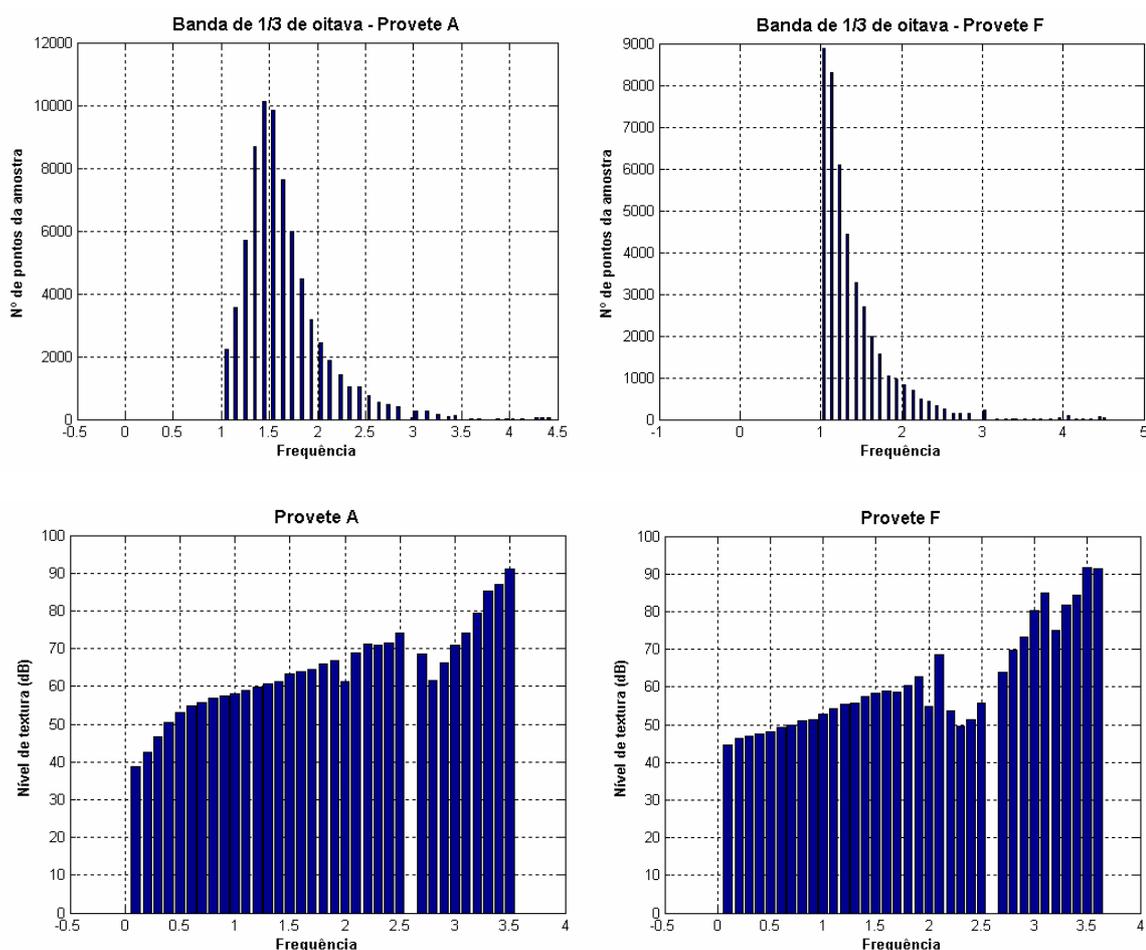


Figura 7.14 – Distribuição do número de pontos e nível de textura dos provetes A e F

Embora fora do âmbito deste estudo, essa verificação constitui um objecto de estudo essencial para o conhecimento do efeito do tipo de superfície na produção do ruído, pelo que deverá ser abordada e analisada com maior acuidade em trabalhos futuros.

7.6 Caracterização dos veículos de ensaio

7.6.1 Características dos veículos de acordo com a Norma ISO 11819-1:1997

Uma vez que a realização dos ensaios foram efectuados antes da entrada do pavimento ao serviço, fez-se uma selecção prévia dos veículos de ensaio, de acordo com o estabelecido na Norma ISO 11819-1:1997. Portanto, os veículos seleccionados para a realização dos ensaios fazem parte das categorias preconizadas na norma adoptada e procuram representar uma amostra significativa do tipo de veículos que circulam numa estrada ou auto-estrada.

Deste modo, o conjunto de veículos utilizados é constituído por (Figura 7.15):

- 4 veículos ligeiros (1 Volvo S40; 1 Citroën Xsara Picasso; 1 Nissan Terrano II; 1 Renault Traffic);
- 1 veículo pesado de 2 eixos (Mercedes);
- 1 veículo pesado de multi-eixos (Scania).



Figura 7.15 – Veículos de ensaio (condições seco e molhado)

7.6.2 Características dos veículos e pneus para o Decreto-Lei n.º 72-C/2003

No método de ensaio dos níveis das emissões sonoras de pneu em estrada - ensaio com o motor desligado - o veículo de ensaio deve ser um automóvel e estar equipado com quatro pneus em rodados simples, em apenas dois eixos, e deverão ser idênticos ou seja, do mesmo tipo e gama.

Assim, os veículos seleccionados para a realização dos ensaios foram duas viaturas ligeiras, equipadas com quatro pneus da classe C1 e assimétricos:

- Volvo S40 2.0D, equipado com 4 Pneus Michelin Primacy 205/55 R16 91V (Figura 7.16);
- Citroën Xsara Picasso, equipado com 4 Pneus Michelin Energy 185/65 R15 88H (Figura 7.17).



Figura 7.16 – Veículo Volvo S40 e pneu Michelin Primacy 205/55 R16 91V



Figura 7.17 – Veículo Citroën Xsara Picasso e piso do pneu Michelin Energy 185/65 R15 88H

O pneu Michelin Primacy caracteriza-se por apresentar uma largura superior (+ 20 mm) do que a do pneu Michelin Energy e uma escultura assimétrica em que os segmentos do lado esquerdo são bastante diferentes em relação aos segmentos do lado direito.

Além disso, apresenta três ranhuras circunferenciais que permitem uma maior ventilação das bolsas de ar e, conseqüentemente, apresentar uma diminuição dos níveis de ruído pneu/ pavimento.

O pneu Michelin Energy apresenta igualmente um perfil assimétrico onde as ranhuras circunferenciais e transversais permitem uma maior aderência mas em contrapartida proporcionando níveis de ruído superiores.

7.7 Caracterização das velocidades dos veículos de ensaio e número de passagens

7.7.1 De acordo a Norma ISO 11819-1:1997

Embora a norma estabeleça 3 categorias de estradas, com velocidades de referência, de acordo com a escala de velocidades a que o tráfego circula, e que geralmente esta associada a determinadas áreas urbanas, suburbanas e rural entre outras, neste ensaio foram consideradas duas categorias de velocidade em estrada:

- Categoria de estrada de velocidade “média”: condições associadas a tráfego que circula a uma velocidade média de 65 a 99 Km/h – velocidade de referência 80 Km/h;
- Categoria de estrada de velocidade “elevada”: condições associadas a tráfego que circula a uma velocidade média de 100 Km/h ou mais – velocidade de referência 100 Km/h. Os veículos pesados podem circular uma velocidade média mais baixa, devido às limitações da velocidade.

Esta selecção pretendeu representar aproximadamente a realidade de circulação rodoviária nas auto-estradas portuguesas. Deste modo, foram consideradas: velocidade média, para ligeiros e pesados, e velocidade elevada, para ligeiros combinada com a velocidade media de passagem de pesados.

Assim, o estabelecimento da velocidade de ensaio teve em conta as restrições previstas na legislação portuguesa para as vias com características de auto-estrada ou seja, para os veículos pesados considerou-se o limite máximo de 90 Km/h e para os veículos ligeiros considerou-se o limite máximo de 120 Km/h.

Conforme referido no ponto 7.2.1, a norma define um número mínimo de 180 passagens sendo de 100 e 80 para os veículos de categoria 1 e veículos da categoria 2a e 2b, respectivamente. Neste estudo, os veículos efectuaram na totalidade cerca de 270 passagens, distribuídas proporcionalmente pelas seguintes configurações de ensaio: betão betuminoso clássico nas condições seco e molhado e betão betuminoso drenante nas condições seco e molhado.

No entanto, cerca de 23% foram rejeitadas posteriormente devido à detecção de níveis sonoros elevados provenientes de ruídos não associados directamente à passagem do veículo sobre o pavimento, como por exemplo, ruído proveniente de travões quando a travagem era efectuada antes de tempo ou ruído devido ao compartimento de carga. Também foram rejeitadas medições cuja velocidade associada excedeu os referidos 3% de desvio máximo admissível. No Quadro 7.7 apresenta-se o número de passagens válidas para cada nível de velocidade, categoria de veículo, tipo de camada e estado da superfície.

Quadro 7.7 – Número de passagens válidas para cada categoria de velocidade

Categoria do veículo	Velocidade média Velocidade de ref. ^a (80/70 Km/h)		Velocidade alta Velocidade de ref. ^a (110 Km/h)	
	Superf. seca (Drenante/Clássico)	Superf. molhada (Drenante/Clássico)	Superf. seca (Drenante/Clássico)	Superf. molhada (Drenante/Clássico)
Ligeiro	23 / 24	19 / 16	11 / 21	16 / 16
Pesado de 2 eixos	6 / 8	9 / 9	-	-
Pesado multi-eixos	8 / 8	7 / 6	-	-

7.7.2 De acordo com o Decreto-Lei n.º 72-C/2003

O Decreto-Lei n.º 72-C/2003 estabelece que devem ser efectuadas, pelo menos, quatro medições em cada lado do veículo de ensaio a velocidades inferiores à velocidade de referência e pelo menos quatro medições a velocidades superiores à velocidade de referência. Assim, as velocidades do veículo de ensaio devem estar incluídas na gama:

- De 70 a 90 Km/h, para os pneus da classe C1 e da classe C2;
- De 60 a 80 Km/h, para os pneus da classe C3.

Sendo que, a velocidade de referência – (V_{ref}) – para a determinação do resultado final será:

- 80 Km/h, para os pneus da classe C1 e da classe C2;
- 70 Km/h, para os pneus da classe C3.

Assim, foram realizadas 16 medições para cada veículo e camada em estudo, a velocidades inferiores e a velocidades superiores à velocidade de referência, tendo sido utilizados dois sonómetros, de modo a permitir que as medições fossem efectuadas em simultâneo para cada passagem do veículo.

No Quadro 7.8 resumem-se as condições de ensaio onde se apresenta o número de passagens para a gama de velocidade, categoria de pneu e tipo de camada.

Quadro 7.8 – Número de passagens para a categoria de pneu

Classe do pneu	Gama de velocidade (70 a 90 Km/h) Velocidade de ref. ^a (80 Km/h)	
	Betão Betuminoso Clássico	Betão Betuminoso Drenante
C1 (205/55 R16 91V)	16	16
C1 (185/65 R15 88H)	16	16

7.8 Caracterização das condições meteorológicas e temperatura do pavimento.

A temperatura da superfície do pavimento e a velocidade do vento são dois factores climáticos que influenciam o ruído, devendo os seus efeitos serem corrigidos. De uma forma geral, um aumento de temperatura ou uma redução da velocidade do vento traduz-se numa redução do nível de ruído. Em função do local onde são efectuadas as medições da temperatura (ar, pneu, superfície do pavimento), a correcção a fazer-se ao nível de ruído varia.

As normas estabelecem que a temperatura do ar e pavimento, bem como a velocidade do vento deverão ser observadas. Além disso, referem também que a temperatura do ar deverá ser medida em intervalos de 15 minutos, que a temperatura da superfície do pavimento deve

situar-se entre os 5°C e os 50°C e que a velocidade do vento à altura do microfone não exceda 5 m/s durante as medições, já que as mesmas influenciam o ruído.

A velocidade do vento influencia fortemente o ruído aerodinâmico a velocidades superiores a 120 Km/h para os veículos ligeiros e a 90 Km/h para os veículos pesados. Como as velocidades dos veículos de ensaio foram, de um modo geral, inferiores a estes limites e a velocidade do vento se compreendeu entre 1 m/s e 4 m/s, não foram efectuadas correcções relativas ao vento (Quadro 7.9).

No Quadro 7.9 para além das condições atmosféricas (temperatura do ar e velocidade do vento), apresenta-se também a temperatura do pavimento, a qual se manteve abaixo dos 50°C de acordo com o preconizado nas normas de ensaio.

Quadro 7.9 – Valores observados para a temperatura do ar, velocidade do vento e temperatura do pavimento

Tempo (min.)	Temperatura do ar (°C)	Velocidade do vento (m/s)	Temperatura do pavimento (°C)
0	25	1 - 2	21,6
15	26	1 - 2	25,0
30	25	1 - 2	27,0
45	25	1 - 2	28,0
60	24	2 - 3	26,0
75	24	2 - 3	27,0
90	22	2 - 3	27,0
105	23	2 - 3	29,0
120	22	3 - 4	30,0
135	21	3 - 4	31,3
150	21	3 - 4	31,9
165	20	3 - 4	30,2
180	21	2 - 3	30,6
195	20	3 - 4	29,3
210	21	2 - 3	28,6
225	20	3 - 4	21,0
240	19	2 - 3	19,0
255	16	1 - 2	19,0
270	16	1 - 2	15,2
285	16,5	1 - 2	15,4
300	17,5	1 - 2	15,8
315	18	2 - 3	18,0
330	17,6	2 - 3	18,0
345	18	3 - 4	19,6
360	17	3 - 4	18,2
375	18,7	1 - 2	16,2
390	21	1 - 2	15,6
405	23	1 - 2	20,8

8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

8.1 Decreto-Lei n.º 72-C/2003 de 14 de Abril

A realização do ensaio preconizado no Decreto-Lei n.º 72-C/2003 teve por objectivo a análise do ruído de interacção pneu/pavimento produzido por dois tipos de pneus em duas superfícies de pavimento apenas com condições de superfície secas. A metodologia de ensaio já foi apresentada no ponto 7.2.2.

Neste capítulo faz-se apenas um breve resumo das principais condições de ensaio e analisa-se detalhadamente os resultados obtidos.

Assim, os veículos seleccionados para a realização dos ensaios nos pavimentos em estudo, foram duas viaturas ligeiras, Volvo S40 2.0D e Citroën Xsara Picasso, as quais estavam equipadas, desde a origem, com 4 pneus da mesma classe C1, Michelin Pimacy e Michelin Energy, respectivamente (Figuras 7.16 e 7.17).

Como indicado nas condições do ensaio expostas no anexo do referido Decreto-Lei, para efectuar todas as medições, cada veículo foi conduzido em linha recta sobre o trecho em medição, entre as linhas A-A' e B-B' (Figura 8.1). Quando a extremidade dianteira do veículo de ensaio alcançou a linha A-A', o condutor colocou a alavanca de velocidades na posição neutra e desligou o motor, até ter passado a linha B-B', sendo medido entretanto o nível sonoro máximo, expresso em decibéis, ponderado A.

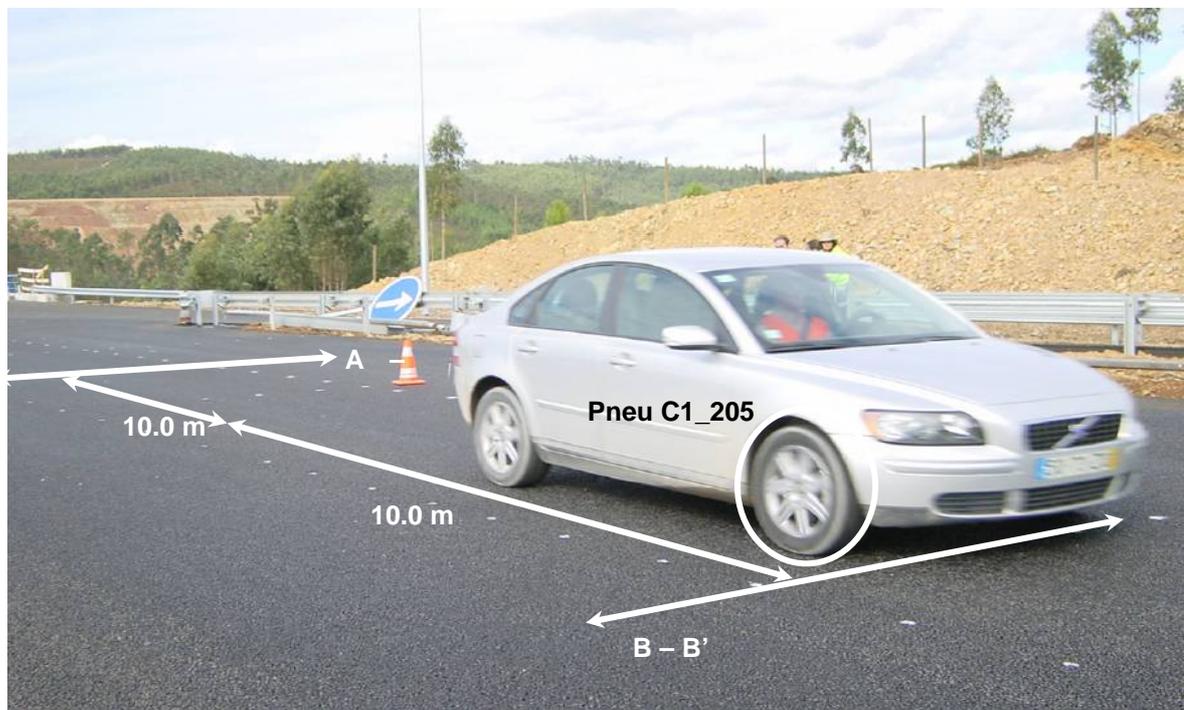


Figura 8.1 – Esquema de localização das medições

Foram efectuadas medições dos dois lados de cada veículo de ensaio a velocidades compreendidas entre 70 Km/h e 90 Km/h. Em cada lado do veículo e para velocidades inferiores à velocidade de referência (80 Km/h) foram realizadas quatro medições. Este processo foi repetido para velocidades superiores à velocidade de referência.

Os resultados obtidos neste ensaio são abordados de três formas distintas:

A primeira abordagem diz respeito à relação entre a velocidade de circulação e o nível sonoro máximo obtido no ensaio, para cada tipo de pavimento (a viatura desloca-se com motor desligado e em ponto morto);

A segunda abordagem diz respeito à relação entre o nível de pressão sonora obtido em cada pavimento e cada tipo de pneu;

A terceira abordagem diz respeito à relação entre os espectros de frequência obtidos em cada pavimento e cada tipo de pneu.

8.1.1 Análise da relação velocidade de circulação e nível sonoro máximo

No Quadro 8.1 apresentam-se os valores obtidos para a gama de velocidades de circulação compreendida entre os 70 Km/h e 90 Km/h, nos dois pavimentos em estudo, e para cada tipo de pneu.

Quadro 8.1 – Níveis de pressão sonora máximos para cada tipo de pavimento, pneu e velocidade de circulação

Veículo/ Pneu	Camada em betão betuminoso clássico		Veículo/ Pneu	Camada em betão betuminoso drenante	
	Veloc. (Km/h)	L _{max} dB(A)		Veloc. (Km/h)	L _{max} dB(A)
Volvo S40	64	70,6	Volvo S40	80	73,8
	73	72,9		84	74,5
	81	74,5		78	73,7
	80	74,4		76	73,7
	86	74,0		88	75,5
	87	74,7		92	75,7
	85	74,1		85	74,5
	87	74,3		82	74,1
	64	71,7		80	73,6
	73	73,9		84	74,2
	81	75,4		78	73,0
	80	75,4		76	72,7
	86	76,2		88	74,3
	87	76,3		92	74,9
	85	75,8		85	73,7
87	75,9	82	73,6		
Citoén Xsara Picasso	67	72,5	Citoén Xsara Picasso	75	74,0
	69	72,7		74	72,6
	69	72,2		77	73,3
	76	73,4		76	74,6
	98	70,7		85	74,9
	78	73,5		89	74,3
	88	75,1		88	74,4
	84	74,9		85	75,0
	67	74,9		75	73,6
	69	75,8		74	75,2
	69	75,9		77	74,6
	76	76,0		76	74,1
	98	79,0		85	74,7
	78	76,8		89	75,5
	88	77,6		88	76,2
84	78,1	85	74,8		

Nas Figuras 8.2 e 8.3 apresenta-se as relações obtidas entre os níveis de pressão sonora e as velocidades de circulação, constantes do Quadro 8.1.

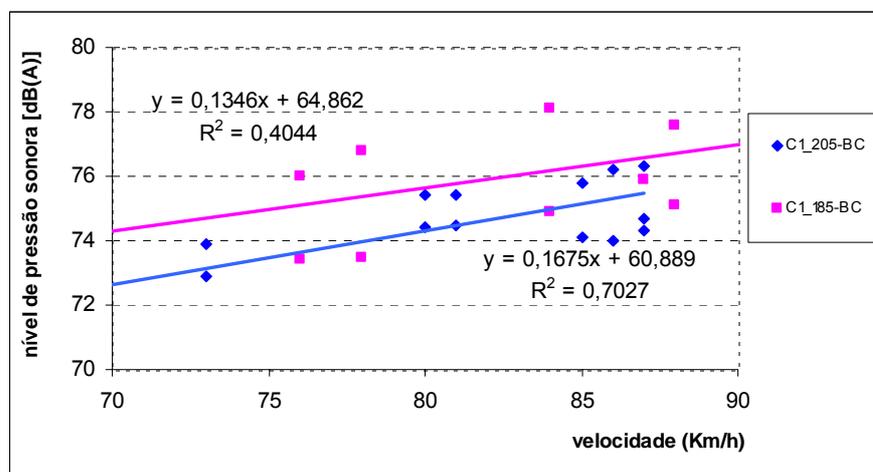


Figura 8.2 – Níveis de pressão sonora máximos no pavimento clássico, para os pneus em estudo

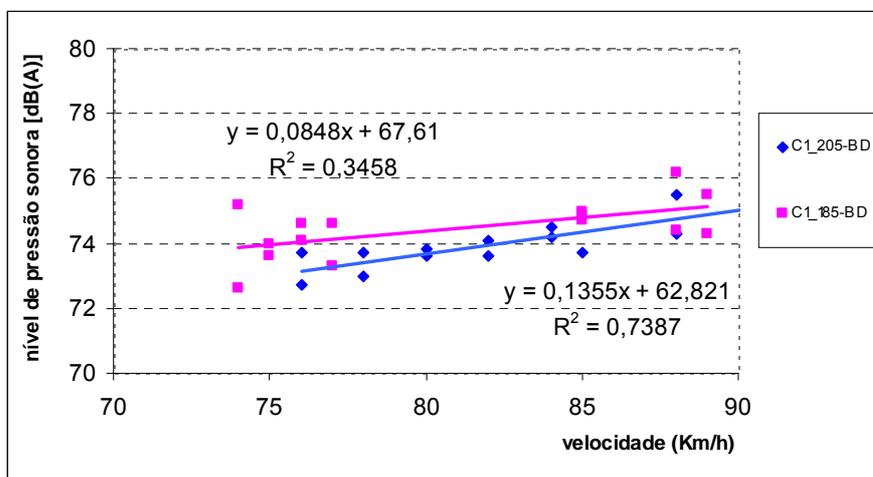


Figura 8.3 – Níveis de pressão sonora máximos no pavimento drenante, para os pneus em estudo

No Quadro 8.2 apresentam-se os parâmetros da recta de regressão entre o nível de pressão sonora e a velocidade de ensaio e os parâmetros estatísticos de cálculo do nível de ruído pneu pavimento definido no ponto 7.2.2.

Quadro 8.2 – Análise de regressão e níveis de ruído pneu/pavimento à velocidade de referência

Parâmetros da regressão	Betuminoso Clássico		Parâmetros da regressão	Betuminoso Drenante	
	C1_205-BC Veic. Volvo	C1_185-BC Veic. Xsara		C1_205-BD Veic. Volvo	C1_185-BD Veic. Xsara
n. de passagens	16	16	n. de passagens	16	16
declive da recta (a)	30,0	11,9	declive da recta (a)	26,2	15,9
ordenada na origem (b)	17,3	52,3	ordenada na origem (b)	23,8	44,2
correlação (r)	0,9	0,3	correlação (r)	0,9	0,6
L _{max} , médio dB(A)	74,4	74,9	L _{max} , médio dB(A)	74,1	74,5
Veloc. média (Km/h)	80	79	Veloc. média (Km/h)	83	81
Vref. (Km/h)	80	80	Vref. (Km/h)	80	80
L _R , dB(A)	74	75	L _R , dB(A)	73	74
L _R - 1 (*)	73	74	L _R - 1 (*)	72	73

(*) Para ter em consideração as eventuais imprecisões dos instrumentos de medida, o nível de ruído pneu/pavimento deverá ser reduzido em um 1dB(A)

Com base nos resultados apresentados pode-se concluir que de uma forma geral a dispersão dos resultados é superior nos ensaios realizados com o pneu C1_185-BC (usados no veículo Xsara), como se verifica pelo reduzido coeficiente de correlação (r) apresentado no Quadro 8.2. No pavimento em betão betuminoso clássico podem observar-se diferenças superiores a 2 dB(A) em ensaios realizados à mesma velocidade.

No que respeita à influência do tipo de pavimento, verifica-se que para o pneu C1_205-BD a variabilidade é semelhante ($r=0,9$), enquanto para o pneu C1_185-BC há uma melhoria significativa no coeficiente de correlação, indicando que o pavimento poderá ter uma influência menor nos resultados obtidos para a camada drenante.

A comparação do declive da recta de regressão indica que o nível de ruído aumenta mais com o aumento da velocidade no caso do pneu C1_205-BC nos dois tipos de pavimento, embora com menor importância no caso do pavimento drenante.

Este comportamento pode ser explicado pelo efeito da largura do pneu e pela perda da capacidade de escoamento do ar devido à presença de ranhuras circunferenciais, com o aumento da velocidade.

Conclui-se que para pavimentos em betão betuminoso clássico e velocidades elevadas a escultura do pneu revela-se como um factor preponderante na redução do ruído – as rectas de regressão são aproximadamente paralelas – podemos ainda concluir que em pavimentos em betão betuminoso drenante e para esta mesma gama de velocidades – comuns nas auto-estradas – a diminuição de ruído deveu-se essencialmente à contribuição do pavimento e em menor grau à escultura do pneu.

8.1.2 Análise do nível de ruído (L_R)

Na Figura 8.4 apresenta-se a relação entre o nível de pressão sonora (L_{R-1}) determinado para a velocidade de referência de 80 Km/h em função do tipo de pneu e do tipo de superfície.

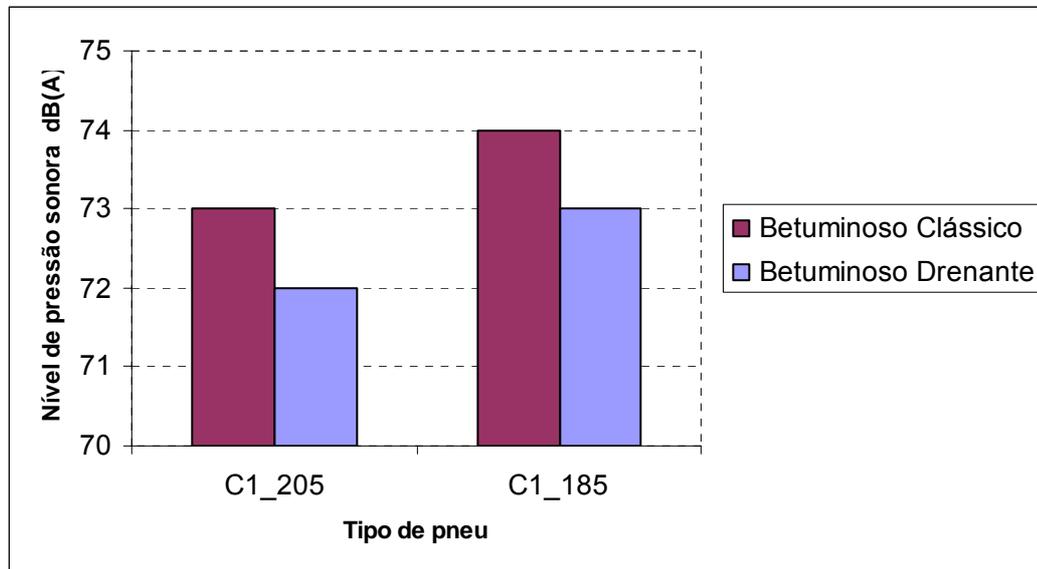


Figura 8.4 – Níveis de pressão sonora para os pavimentos e pneus em estudo para a velocidade de referência

A diferença entre níveis sonoros é superior para as velocidades mais baixas em ambos os pavimentos e desprezável a velocidades elevadas para o caso do pavimento drenante. À velocidade de referência observa-se uma diferença de 1 dB(A) entre os dois tipos de pavimento considerando o mesmo pneu e uma diferença de um 1 dB(A) entre os dois tipos de pneu considerando a mesma superfície.

Conclui-se ainda, que a escultura do pneu, bem como, a respectiva largura influenciaram os mecanismos geradores de ruído, provocando a diferença de 1 dB (A) no nível de ruído. Apesar do pneu C1_205 ser mais largo em 20 mm, esta desvantagem foi compensada por uma assimetria significativa com diferentes dimensões de blocos e diversidade na orientação e comprimento dos drenos, possuindo ainda um piso longitudinal com três sulcos que permitem evitar bolsas de ar fechadas, pelo que, os valores obtidos para os níveis sonoros evidenciaram estas propriedades.

8.1.3 Análise do espectro de ruído

Conforme referido no capítulo 5, os mecanismos de vibração do pneu e a respectiva escultura reflectem-se de forma diferente no espectro de ruído. O efeito da vibração do pneu associa-se às baixas frequências, até aos 1000 Hz aproximadamente, as frequências altas associam-se ao efeito da escultura do pneu.

No Anexo V apresentam-se os níveis sonoros obtidos em cada banda de 1/3 de oitava, para a velocidade de ensaio, nos dois tipos de pavimento e para os dois tipos de pneu.

No Anexo VI representa-se o andamento do espectro de frequência relativo aos dados do Anexo V.

Tendo como objectivo analisar de uma forma geral a contribuição dos pavimentos no ruído pneu/pavimento, apresenta-se nas Figuras 8.5 e 8.6 os espectros de ruído médio para cada tipo de pneu e de superfície.

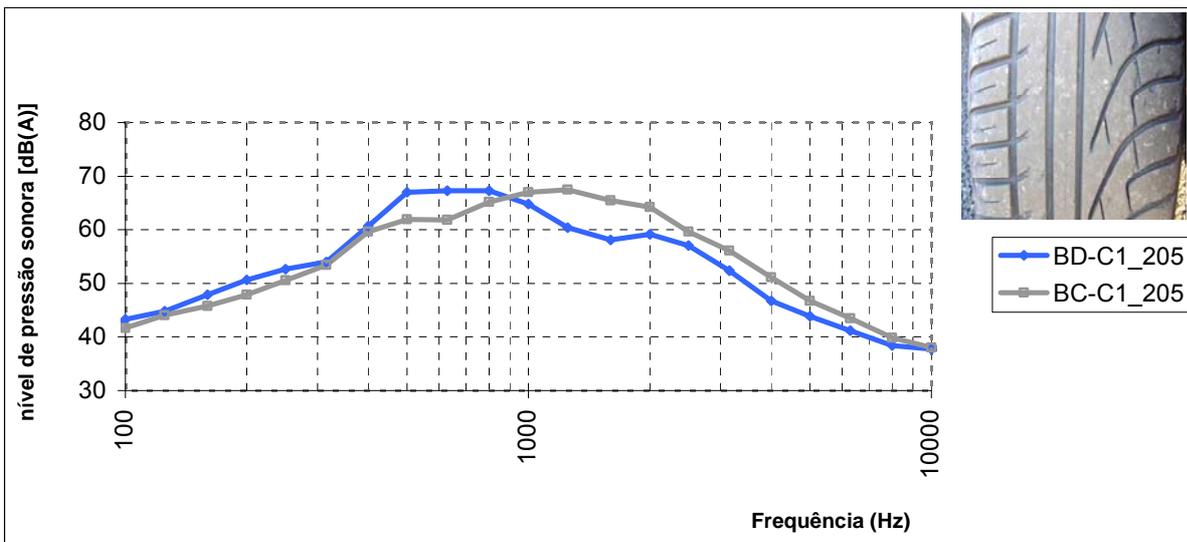


Figura 8.5 – Espectro de frequência para o pneu C1_205, nos pavimentos em estudo

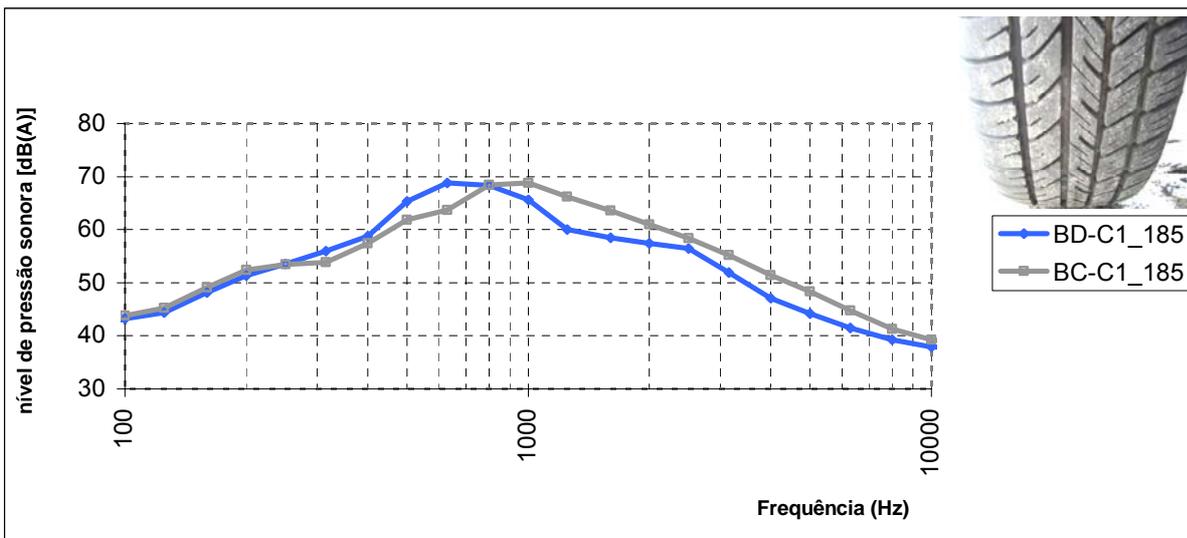


Figura 8.6 – Espectro de frequência para o pneu C1_205, nos pavimentos em estudo

Da análise destas Figuras, constata-se que:

- A ausência de picos nos troços ascendentes revela o reduzido impacto entre o pneu e o pavimento (esta conclusão também é retirada da análise dos gráficos apresentados no Anexo VI);
- As maiores diferenças em ambas as Figuras verificam-se para a gama de frequências entre os 400 Hz e os 2000 Hz, o que nos indica que quer a vibração quer a escultura influenciaram o nível de ruído;
- Em ambas as Figuras, no ramo ascendente, verifica-se que entre os 400 e 900 Hz aproximadamente, o pavimento em betão betuminoso clássico apresenta níveis de ruído mais atenuados. Neste caso denota-se a componente do ruído associada à maior vibração provocada pela textura do pavimento drenante;
- Para frequências superiores a 900 Hz o pavimento em betão betuminoso drenante apresenta níveis de ruído mais atenuados, sendo visível a minoração da componente do ruído provocada pelo efeito do bombeamento do ar, facultados pela macro-textura e/ou porosidade mais acentuada;
- Para o pavimento em betão betuminoso drenante, no ramo descendente de ambas as figuras, entre os 1250 e 2000 Hz, a atenuação de ruído é variável – numa das figuras verifica-se um “patamar” e na outra um “mínimo” – características associadas a absorção sonora inerente à elevada porosidade deste tipo de pavimento;
- O pneu C1_205 maximiza a atenuação do ruído devido à menor vibração no pavimento em betão betuminoso clássico e a atenuação do ruído devido ao melhor bombeamento do ar no pavimento em betão betuminoso drenante como se comprova pelas diferenças observadas no ramo ascendente relativo ao pavimento em betão betuminoso clássico e no ramo descendente relativo ao pavimento em betão betuminoso drenante.

8.2 Norma ISO 11819-1:1997

Este ensaio teve por base a norma ISO 11819-1 (1997) definida no ponto 7.2.1. O método denominado por SPB (Statistical Pass-By method) baseia-se na determinação do nível sonoro em vias rodoviárias com circulação normal de tráfego e em trechos que obedecem aos critérios estabelecidos na norma.

Embora baseado nesta norma, que refere “*o tráfego que circula na secção da estrada em questão deve apresentar números suficientes de cada uma das categorias de veículos (...) e somente os veículos que claramente se encaixam em qualquer das categorias estabelecidas (ligeiros, pesados de dois eixos e pesados com mais de dois eixos) deverão ser medidos*” este estudo foi efectuado em condições controladas que permitiram a aferição de vários factores condicionantes das regras indicadas na norma, tais como: a mesma marca de pneus por veículo, desgaste dos pneus, ruído anormais do motor, outros ruídos excepcionais e limite de carga legal dos veículos pesados. Recordamos que este ensaio foi efectuado numa fase prévia à abertura da auto-estrada ao tráfego rodoviário.

8.2.1 Análise do nível sonoro máximo

No Anexo VII apresentam-se as figuras dos níveis sonoros obtidos para cada gama de velocidades de circulação, média e alta, e para cada categoria de veículo, nos pavimentos em estudo, nas condições seco e molhado.

Nas Figuras 8.8 a 8.11 apresenta-se o nível sonoro máximo em função da velocidade para as combinações possíveis destas variáveis (velocidade, tipo de veículo, tipo de pavimento, superfície seca e molhada).

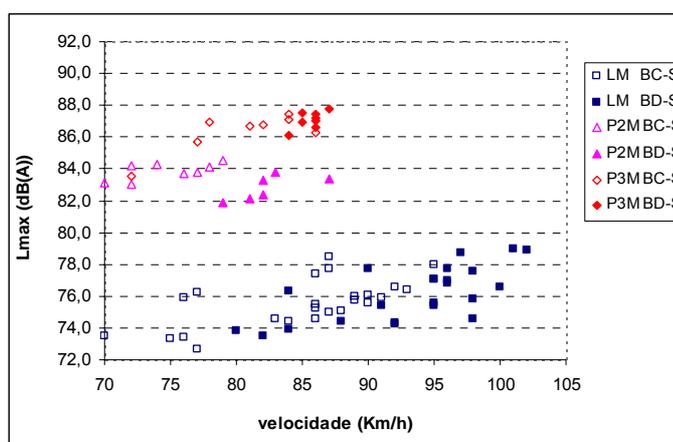


Figura 8.8 – Níveis de ruído para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição seco

Legenda:

- LM veículo ligeiro, velocidade média;
- LA veículo ligeiro, velocidade elevadas;
- BC betão betuminoso clássico;
- BD betão betuminoso drenante;
- P2M veículo pesado com 2 eixos, velocidade média;
- P3M veículo pesado com 3 eixos, velocidade média;
- S superfície seca;
- Mo superfície molhada.

Da comparação dos resultados obtidos para os veículos ligeiros a velocidades médias com os das Figuras 8.2 e 8.3, verifica-se que a influência do motor é imperceptível uma vez que os valores se encontram nos mesmos limites, apesar de ter sido considerados veículos cuja forma, em princípio, proporcionavam um nível de ruído superior como os veículos de carga e os veículos todo terreno (Figura 7.15).

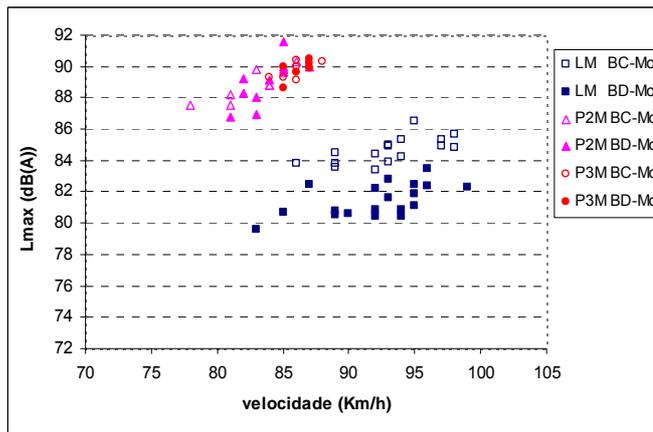


Figura 8.9 – Níveis de ruído para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição molhado

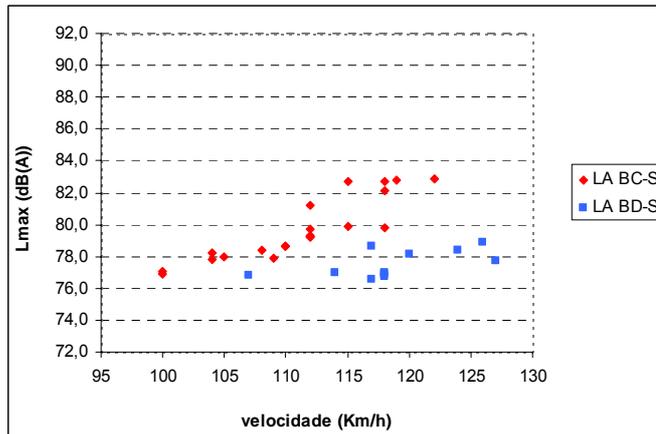


Figura 8.10 – Níveis de ruído para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição seco

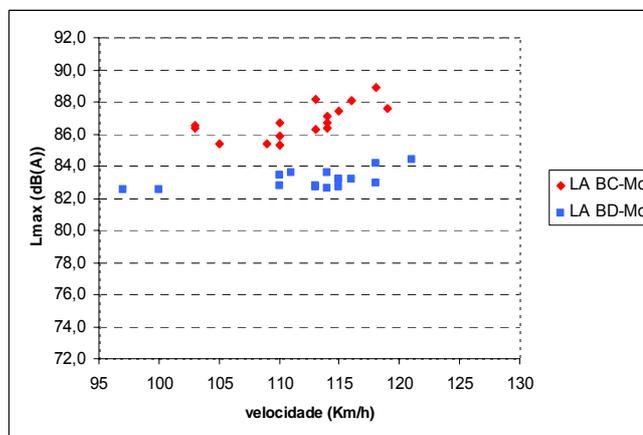


Figura 8.11 – Níveis de ruído para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição molhado

Tendo em conta os dados apresentados pode-se concluir que:

- O nível de pressão sonora é claramente superior quando os pavimentos se encontram molhados.
- O nível de pressão sonora aumenta com o aumento da velocidade de características médias. Isto também se verifica em velocidades altas, apenas para veículos ligeiros. O aumento dos níveis de pressão sonora para velocidades altas é menor do que para velocidades médias;
- Os maiores níveis de pressão sonora provocados pelos veículos ligeiros, a velocidades médias e altas, verificaram-se no pavimento em betão betuminoso clássico molhado, seguido do pavimento drenante molhado, depois pelo pavimento clássico seco e por último, as condições onde se verificaram menores níveis de ruído foram as obtidas no pavimento drenante seco;
- Os maiores níveis de pressão sonora provocados pelos veículos pesados a velocidades médias verificaram-se nos pavimentos clássico e drenante molhados, constatando-se uma aparente sobreposição das leituras realizadas, seguido do pavimento clássico seco e por último, as condições onde se verificaram menores níveis de ruído foram as obtidas no pavimento drenante seco;
- Para os veículos pesados, não se distingue a influência do tipo de pavimento nos níveis de ruído quando este se encontra molhado. Quando este se encontra seco, verifica-se que o pavimento drenante provoca menos ruído que o pavimento clássico, em particular para os veículos de 2 eixos;
- Ainda relativamente aos veículos pesados, tanto nos pavimentos secos como nos molhados, verifica-se que o nível de ruído provocado pelos veículos da categoria de 3 eixos foi superior ao provocado por veículos de dois eixos, sendo que esta distinção é menos visível nos pavimentos molhados, como já referido.

Assim, conclui-se que, em qualquer circunstância, o pavimento drenante seco foi o que provocou menores níveis de ruído, independentemente do tipo de veículo ou das condições seco ou molhado. Também se conclui, que o nível de ruído medido aumentou em função do número de pneus por veículo.

8.2.2 Análise do índice estatístico de passagem

O índice estatístico de passagem SPBI é indicativo do desempenho acústico de uma superfície com base na categoria de veículos, na velocidade de referência e em factores de ponderação como indicado no Quadro 7.1. e através da equação constante no capítulo 7.2.1

Nos Quadros 8.3 a 8.6 apresenta-se os parâmetros necessários para a sua determinação relativamente às superfícies em betão betuminoso clássico e drenante para s condições seco e molhado.

Quadro 8.3 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição seco

SPBI-M BC-S				SPBI-M BD-S			
Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b	Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b
n. de veículos	24	8	8	n. de veículos	23	6	8
ordenada na origem (b)	21,6	49,3	10,1	ordenada na origem (b)	-2,2	5,7	-67,6
declive (a)	28,0	18,4	40,0	declive (a)	39,8	40,3	80,0
coeficiente de correlação (r)	0,6	0,6	0,8	coeficiente de correlação (r)	0,7	0,7	0,7
L_{max} , médio dB(A)	75,6	83,8	86,3	L_{max} , médio dB(A)	76,1	82,8	87,1
desvio padrão (L_{max})	1,5	0,6	1,2	desvio padrão (L_{max})	1,7	0,8	0,5
V média (Km/h)	85	75	80	V média (Km/h)	93	82	86
desvio padrão (V)	7,0	3,0	5,0	desvio padrão (V)	6,0	3,0	1,0
Lveh, velocidade de ref. ^a	74,9	83,3	83,9	Lveh, velocidade de ref. ^a	73,5	80,0	80,1
coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,1	0,1	coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,075	0,1
SPBI	78,9			SPBI	75,8		

Quadro 8.4 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição seco

SPBI-A BC-S				SPBI-A BD-S			
Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b	Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b
n. de veículos	21	8	8	n. de veículos	9	5	4
ordenada na origem (b)	-66,3	49,3	10,1	ordenada na origem (b)	27,0	5,7	-67,6
declive (a)	71,3	18,4	40,0	declive (a)	24,4	40,3	80,0
coeficiente de correlação (r)	0,9	0,6	0,8	coeficiente de correlação (r)	0,6	0,7	0,7
L_{max} , médio dB(A)	79,7	83,8	86,3	L_{max} , médio dB(A)	77,5	82,8	87,1
desvio padrão (L_{max})	2,0	0,6	1,2	desvio padrão (L_{max})	0,8	0,8	0,5
V média (Km/h)	111	75	80	V média (Km/h)	119	82	86
desvio padrão (V)	6,0	3,0	5,0	desvio padrão (V)	6,0	3,0	1,0
Lveh, velocidade de ref. ^a	79,4	83,3	83,9	Lveh, velocidade de ref. ^a	76,7	80,0	80,1
coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,1	0,1	coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,1	0,1
SPBI	81,5			SPBI	78,4		

Quadro 8.5 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades médias, nos pavimentos em estudo, na condição molhado

SPBI-M BC-Mo				SPBI-M BD-Mo			
Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b	Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b
n. de veículos	19	9	7	n. de veículos	19	9	7
ordenada na origem (b)	19,3	-44,4	-15,8	ordenada na origem (b)	22,1	-125,2	-75,6
declive (a)	33,2	69,5	54,6	declive (a)	30,2	111,4	85,5
coeficiente de correlação (r)	0,7	0,9	0,6	coeficiente de correlação (r)	0,6	0,7	0,7
L_{max} , médio dB(A)	84,6	89,0	89,7	L_{max} , médio dB(A)	81,5	88,8	89,8
desvio padrão (L_{max})	0,8	1,1	0,6	desvio padrão (L_{max})	1,0	1,5	0,6
V média (Km/h)	93	83	86	V média (Km/h)	92	84	86
desvio padrão (V)	4,0	3,0	1,0	desvio padrão (V)	4,0	2,0	1,0
Lveh, velocidade de ref. ^a	82,5	83,8	84,9	Lveh, velocidade de ref. ^a	79,6	80,3	82,1
coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,1	0,1	coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,1	0,1
SPBI	83,1			SPBI	80,2		

Quadro 8.6 – Índice estatístico de passagem (SPBI) para velocidades altas, nos pavimentos em estudo, na condição molhado

SPBI-A BC-Mo				SPBI-A BD-Mo			
Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b	Parâmetros	Veic 1	Veic. 2a	Veic. 2b
n. de veículos	16	9	7	n. de veículos	16	9	7
ordenada na origem (b)	13,1	-44,4	-15,8	ordenada na origem (b)	55,8	-125,2	-75,6
declive (a)	36,0	69,5	54,6	declive (a)	13,3	111,4	85,5
coeficiente de correlação (r)	0,6	0,9	0,6	coeficiente de correlação (r)	0,6	0,7	0,7
L_{max} , médio dB(A)	86,8	89,0	89,7	L_{max} , médio dB(A)	83,1	88,8	89,8
desvio padrão (L_{max})	1,1	1,1	0,6	desvio padrão (L_{max})	0,6	1,5	0,6
V média (Km/h)	112	83	86	V média (Km/h)	112	84	86
desvio padrão (V)	5,0	3,0	1,0	desvio padrão (V)	6,0	2,0	1,0
Lveh, velocidade de ref. ^a	86,6	83,8	84,9	Lveh, velocidade de ref. ^a	83,0	80,3	82,1
coeficiente de ponderação (Wx)	0,8	0,1	0,1	coeficiente de ponderação (Wx)	0,7	0,1	0,1
SPBI	86,5			SPBI	82,6		

Para facilitar a análise dos resultados, apresenta-se no Quadro 8.7 apenas o índice estatístico de passagem (SPBI), discriminado segundo as duas gamas de velocidades, média e alta, e para as diferentes combinações das características dos dois pavimentos.

Quadro 8.7 – Índice estatístico de passagem (SPBI)

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 deste quadro pode concluir-se que:

- A presença de água na superfície do pavimento provoca um aumento do ruído de 4 dB(A), com excepção do pavimento em betão betuminoso clássico para velocidades altas, que origina um aumento de 5 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;
- As relações foram obtidas numa fase prévia à abertura ao tráfego, pelo que será expectável que em fase de exploração estas se alterem ao longo do tempo.

8.2.3 Análise do espectro de ruído

Para a análise dos espectros médios de frequências, são apresentados como informação auxiliar no Anexo VIII os espectros obtidos para cada gama de velocidades de circulação – média e alta – e para cada categoria de veículo, nos pavimentos em estudo, nas condições seco e molhado.

Para ser possível uma análise global dos resultados, na Figura 8.12 são apresentados os espectros médios de ruído para velocidades médias nas camadas em betão betuminoso clássico e drenante, nas condições seco e molhado. O espectro médio, foi obtido através da média dos vários espectros correspondentes aos espectros das 16 medições efectuadas e constantes no Anexo VIII.

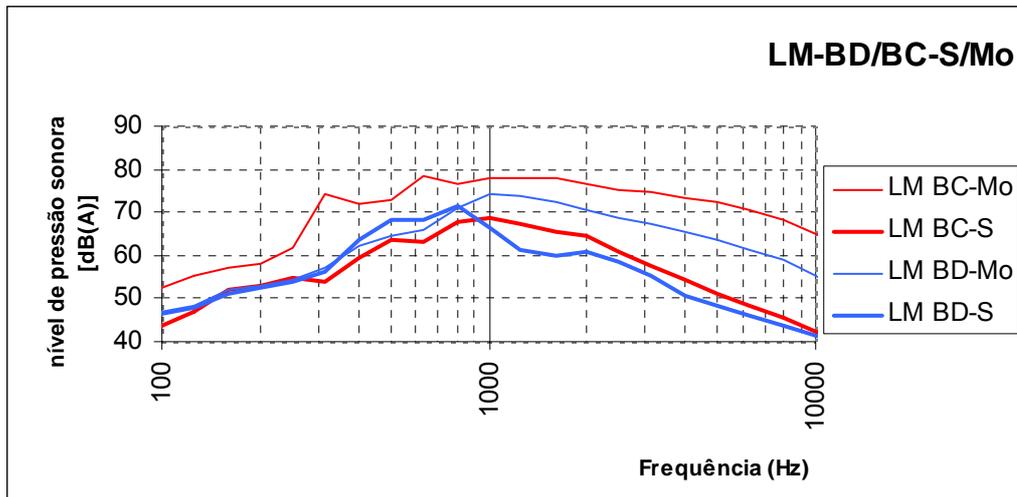


Figura 8.12 – Espectro médio de frequências para ligeiros em velocidades médias, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado

A partir de essa figura verifica-se que:

- Para qualquer frequência, o pavimento em betão betuminoso drenante na presença de água reduziu o nível de ruído em cerca de 6 dB (A) (diferença de LM BC-Mo e LM BD-Mo);
- No ramo ascendente, verifica-se que entre os 300 e 900 Hz aproximadamente, o pavimento em betão betuminoso clássico seco apresenta níveis de ruído inferiores. Neste caso denota-se a componente do ruído associada à maior vibração provocada pela textura do pavimento em betão betuminoso drenante;
- Para frequências superiores a 900 Hz o pavimento em betão betuminoso drenante seco apresenta níveis de ruído inferiores, sendo visível a minoração da componente do ruído provocada pelo efeito do bombeamento do ar, facultados pela macro-textura mais acentuada (constatação similar à verificada no ensaio do motor desligado);
- No ramo descendente, do pavimento em betão betuminoso drenante, o aumento do ruído na presença de água é menor em cerca de 50% comparativamente ao pavimento em betão betuminoso clássico, ou seja, aproximadamente nesta proporção (50%) constatou-se a eficácia do pavimento em betão betuminoso drenante na redução do ruído devido aos fenómenos do bombeamento do ar “splash/ spray”;

- Para o pavimento em betão betuminoso drenante seco no ramo descendente, entre os 900 e 2000 Hz, a atenuação de ruído é variável; o que pode resultar da variabilidade da absorção sonora inerente à elevada porosidade deste tipo de pavimento.

Na Figura 8.13 são apresentados os espectros médios de frequência para velocidades altas, nas camadas em betão betuminoso clássico e drenante e nas condições seco e molhado.

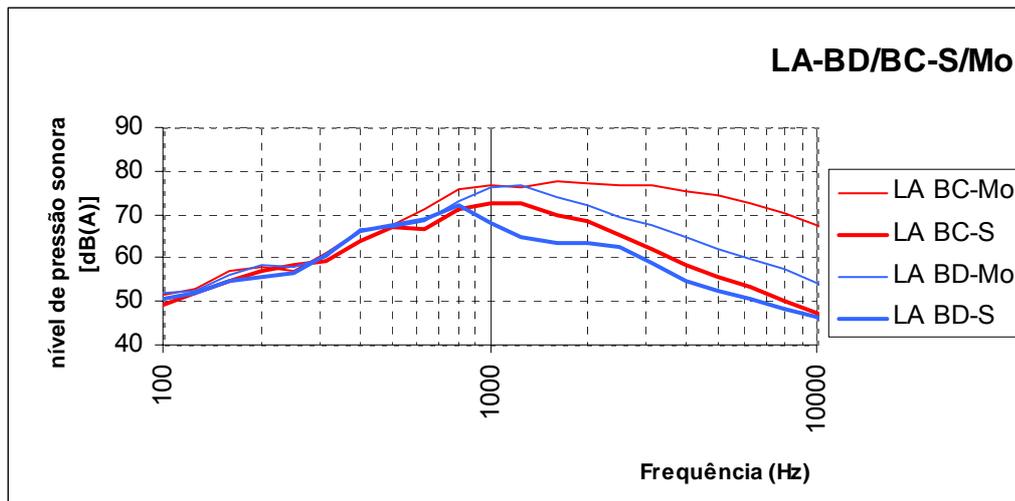


Figura 8.13 – Espectro médio de frequências para ligeiros em velocidades altas, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado

Da análise da Figura 8.13, pode constatar-se que:

- Para baixas frequências, ramo ascendente do gráfico, até aos 700 Hz, verificou-se um comportamento similar para os veículos ligeiros em alta velocidade, em ambas as superfícies para as condições de secos ou molhados. Possivelmente esta constatação, deve-se à porosidade reduzida do betão betuminoso drenante aplicado nestes trechos (próxima do limite inferior permitido no Caderno de Encargos). A quantificação da água presente no pavimento, neste caso concreto, pode ser um factor preponderante;
- Para frequências superiores a 900 Hz o pavimento em betão betuminoso drenante seco apresenta níveis de ruído inferiores, sendo visível a minoração da componente do ruído provocada pelo efeito do bombeamento do ar, facultados pela macro-textura mais acentuada (constatação similar à verificada no ensaio do motor desligado);
- Para o pavimento em betão betuminoso drenante seco no ramo descendente, entre os 900 e 2000 Hz, a atenuação de ruído é variável, o que pode resultar da absorção sonora inerente à elevada porosidade deste tipo de pavimento;

- No ramo descendente a partir dos 1750 Hz e com o aumento da frequência, a contribuição do pavimento em betão betuminoso drenante na presença de água foi reduzindo substancialmente o nível de ruído até cerca de 12 dB (A), a 10000 Hz (diferença LMMo-C e LMMo-D). Assim, para velocidades altas, na presença de água, o pavimento em betão betuminoso drenante não contribuiu para a redução do ruído associado à vibração do pneu, mas contribuiu para a redução significativa e crescente da componente do ruído associada ao efeito do bombeamento do ar;
- Com a passagem da gama de velocidades “médias” para uma gama de velocidades “altas”, verificou-se que a atenuação do ruído devido ao efeito do bombeamento do ar no pavimento em betão betuminoso drenante em condições secas, vai diminuindo até um limite de 5 dB(A), correspondentes a 10000 Hz, (diferença obtida entre LAS-D da Figura 8.13 e LMS-D da Figura 8.12).

Relativamente aos espectros médios de ruído para veículos pesados a velocidade média, em ambos os pavimentos, seco ou molhado, verifica-se que (Figura 8.14):

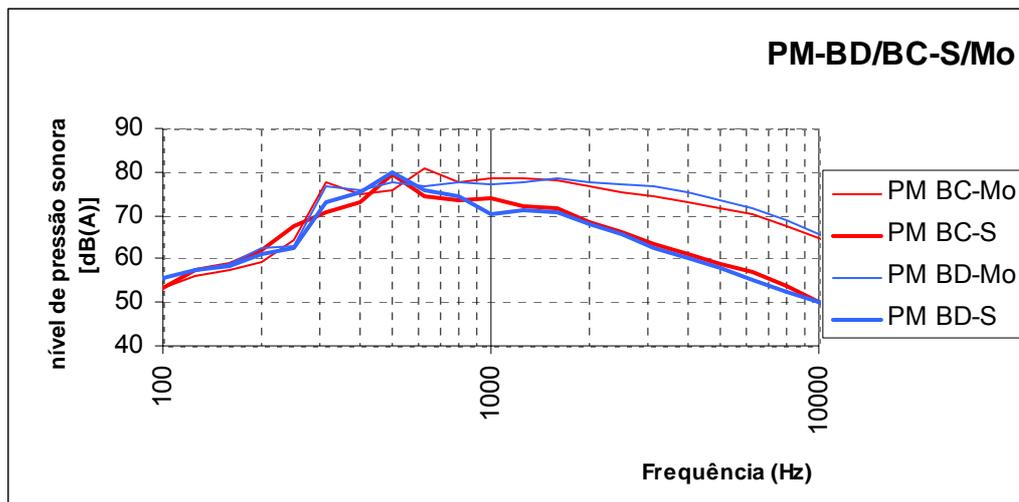


Figura 8.14 – Espectro médio de frequências para pesados a velocidades médias, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado

No ramo descendente, quer no pavimento em betão betuminoso clássico quer no drenante, a presença de água traduz-se num aumento crescente de ruído desde as frequências médias (600 Hz) até as frequências muito altas (10000 Hz). De notar que nesta situação, o ramo descendente recuou cerca de 400 Hz em relação aos veículos ligeiros. Constata-se desse modo, que o nível máximo de ruído ocorre num pequeno intervalo de baixas frequências, entre os 500 e 600 Hz, seja qual for o pavimento e a respectiva condição (seco ou molhado), apresentado um valor de 80 dB(A). Este comportamento resulta essencialmente do tipo de pneu nos veículos pesados, ou seja, mais largo, mais duro, etc.

Todavia, quando se compara o ruído entre veículos ligeiros e pesados a velocidades médias, nas camadas em betão betuminoso clássico e drenante (Figura 8.15), pode concluir-se que:

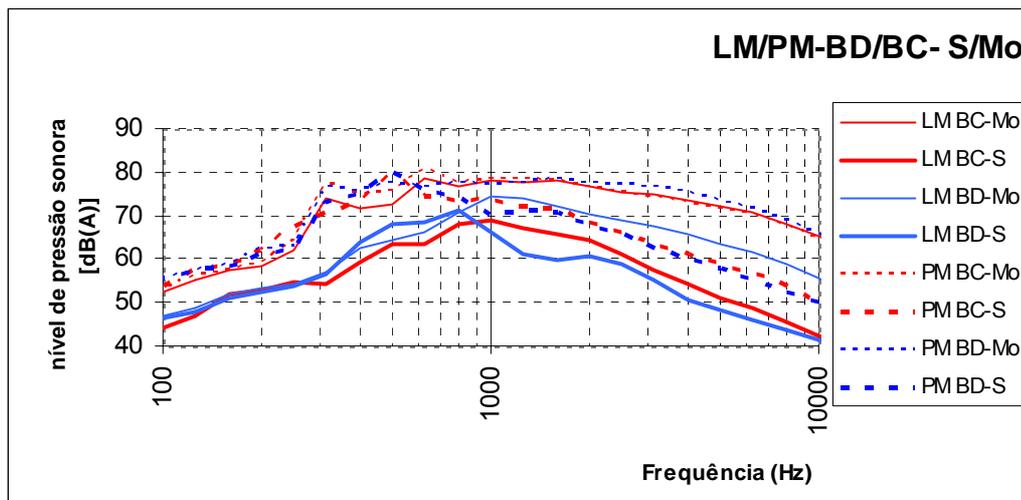


Figura 8.15 – Espectro médio de frequências para ligeiros e pesados a velocidades médias, nos pavimentos em estudo, em condições seco e molhado

- O ruído provocado pelos veículos pesados na condição seco, significa um acréscimo médio de cerca de 8 dB(A) comparativamente ao nível de ruído provocado pelos ligeiros. Este acréscimo tem maior visibilidade no ramo ascendente para o pavimento em betão betuminoso clássico e no ramo descendente para o pavimento em betão betuminoso drenante;
- Numa gama de frequências médias estritas (900 a 1100 Hz), na ausência de água, verificou-se que os níveis de ruído para os 4 casos (viaturas ligeiras, pesadas, clássico, drenante) se aproximam, reduzindo o acréscimo referido no ponto anterior para um valor de cerca de 3 a 4 dB (A);
- Verificou-se também que na presença de água e no ramo descendente, o ruído provado pelos veículos pesados é muito semelhante ao ruído provocado pelos veículos ligeiros num pavimento em betão betuminoso clássico.

8.3 Considerações Finais

Ao longo deste capítulo, que teve como objectivo verificar a eficácia na redução dos níveis sonoros – resultantes da circulação automóvel – num pavimento em betão betuminoso drenante (BD), por oposição a um pavimento em betão betuminoso “clássico” (BC), para as condições seco e molhado, constatou-se que:

- Independentemente do tipo de veículo, pneu e da velocidade de circulação, o pavimento em betão betuminoso drenante atingiu sempre níveis de ruído inferiores;
- O pavimento em betão betuminoso drenante, na condição seco, foi o mais silencioso na ordem de 3 a 4 dB(A) (este valor poderia ter sido ligeiramente maior se a porosidade fosse mais elevada, afastando-se do limite inferior previsto no Caderno de Encargos);

- O maior nível de ruído ocorreu para veículos pesados na condição molhado e em ambos os pavimentos (drenante e clássico);
- A condição molhado no pavimento implica níveis de ruído superiores em cerca de 4 a 5 dB(A);
- Para qualquer frequência, a contribuição do pavimento em betão betuminoso drenante na presença da água reduziu o nível de ruído em cerca de 6 dB (A);
- A otimização da escultura do pneu contribuiu para a redução do ruído em cerca de 2 dB(A).

O comportamento satisfatório do pavimento drenante na redução dos níveis de ruído, comparativamente com os resultados obtidos por outros pavimentos, encontra-se amplamente comprovado nos estudos apresentados no capítulo 4 desta tese.

Como solução para a melhoria dos níveis de ruído já atingidos através do uso dos pavimentos drenantes, recomenda-se o pavimento com dupla camada drenante (*twinlayer*), o qual ainda se encontra por explorar em Portugal e apresenta o maior potencial de sucesso. Este tipo de camada proporciona reduções adicionais de 4 a 6 dB(A), em função da velocidade de circulação, comparativamente à camada drenante única, cuja eficácia já foi confirmada em estudos realizados em diversos países (Figura 4.11).

9 CONCLUSÕES

9.1 Conclusões gerais

O ruído causado pelo tráfego, em estradas de alta velocidade, 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. Em paralelo, os fabricantes dos pneus, desde há algumas décadas, efectuam estudos no sentido de obter sistemas que cumpram os objectivos da indústria automóvel e também que produzam menos ruído.

No entanto, o ruído de interacção pneu/pavimento é um fenómeno complexo visto que há diversos factores, tais como, o modelo, idade e peso do veículo, a pressão, tipo, tamanho e temperatura do pneu, a qualidade e textura da superfície da estrada e a velocidade do veículo. Para além destes factores, o estilo e/ou comportamento de cada condutor também influi nos níveis de ruído.

Estes factores que influenciam o ruído estão interrelacionados e exercem impactes quer sobre os níveis gerais de ruído, quer sobre as componentes da frequência do ruído. Foi demonstrado ao longo de vários estudos, que, no caso dos veículos pesados, os níveis de ruído global são bastante superiores (na ordem dos 10 dB(A)) comparativamente aos níveis de ruído gerados pelos veículos ligeiros.

Dentro dos mecanismos de geração do ruído de interacção pneu-pavimento, destacam-se os mecanismos de origem mecânica e os de origem aerodinâmica. Os de origem mecânica incluem as vibrações radiais, tangenciais e de parede lateral do pneu, assim como, as vibrações “stick-snap” e “stick-slip”. As últimas são aquelas que mais influenciam o ruído, visto que são activadas pelos elementos de rugosidade da estrada que deformam o pneu. Enquanto que nos mecanismos de geração aerodinâmica, o bombeamento do ar e a ressonância na cavidade interna do pneu são os fenómenos que mais influenciam o ruído. Assim, poder-se-á dizer que os níveis de ruído totais são função da textura da superfície e tipo de pneu.

Quanto aos fabricantes dos pneus, é legítimo que tenham como principal objectivo a concepção dum pneu que garanta a máxima segurança. Porém, o factor ruído também não deverá ser desprezado. Assim, em primeiro lugar um pneu deverá remover a água sobre o pavimento molhado para permitir um bom contacto pneu/pavimento e também possuir características que lhe permitam apresentar baixos níveis de ruído.

Os parâmetros dos pneus tais como, a pressão, o diâmetro, a largura e o desenho de escultura do piso, influenciam os níveis de ruído rodoviário, sendo de realçar também que podem ser influenciados pelos diferentes tipos de superfície.

Estudos elaborados para aferir os níveis de ruído pneu/pavimento de veículos com o motor desligado verificaram que a gama dos níveis de ruído pneu/pavimento variam substancialmente dependendo do tipo de superfície de estrada, podendo atingir os 15 dB(A).

Outro factor que influencia fortemente os níveis de ruído, refere-se ao modo como se propaga o ruído a partir da fonte. A medida que a distância à fonte aumenta, o nível de ruído diminui.

Esta situação deve-se ao facto da propagação do som através da atmosfera ser função de vários mecanismos de atenuação, tais como, a superfície ser reflectora ou porosa, à divergência geométrica (distância entre o emissor e o receptor), à absorção atmosférica (temperatura e humidade) e à presença de uma barreira entre a fonte e o receptor.

Com o surgimento das camadas superficiais porosas/drenantes, alguns países europeus conseguiram garantir uma redução do ruído pneu/pavimento em auto-estradas, em particular em condições molhadas, com a redução dos efeitos “splash” e “spray” e com o aumento da aderência entre o pneu e o pavimento, factores estreitamente associados à aferição da porosidade.

As variáveis meteorológicas, tais como a temperatura, a velocidade do vento, e a direcção do vento podem ser muito importantes relativamente à propagação do ruído gerado pelo tráfego rodoviário. Além destas variáveis, outras como, a chuva e a neve também podem afectar o desempenho das camadas superficiais bem como, influenciar os níveis de ruído. Contudo, a avaliação da influência destes factores nos níveis de ruído carece de mais investigação.

Embora tenham sido realizados, em Portugal, diversos estudos para caracterizar os níveis sonoros em diferentes tipos de pavimentos, tais como o pavimento em betão armado, o pavimento rugoso e o pavimento betuminoso modificado com borracha, para a realidade portuguesa ainda não existe uma vasta experiência na avaliação da eficácia da redução dos níveis sonoros em pavimentos em betão betuminoso drenante e em betão betuminoso clássico. Essa experiência é especialmente reduzida quando a superfície do pavimento se encontra sob a influência do parâmetro “água”, pelo que, este estudo teve como principal objectivo verificar a eficácia na redução dos níveis sonoros – resultantes da circulação automóvel – num pavimento em betão betuminoso drenante (BD), por oposição a um pavimento em betão betuminoso “clássico” (BC), para as condições seco e molhado.

Vários são os métodos que existem para avaliar os níveis de ruído nas camadas superficiais e para estabelecer comparações entre as mesmas. Os métodos geralmente mais aplicados são: o método estatístico de passagem (ISO 11819-1: 1997), o método da estrita proximidade (ISO/DIS 11819-2: 2000), o método da passagem controlada (NF S31-119-2: 2000), o método da superfície estendida (ISO 13472-1:2002) e o método Coast-By ou motor desligado (ISO 13325:2003 ou Decreto-Lei n.º 72-C/2003), sendo que, este último, aplica-se para determinar os níveis sonoros devido à interacção pneu/pavimento.

Para a realização deste estudo, foram seleccionados e caracterizados dois trechos experimentais, um em pavimento betão betuminoso drenante (BD) e outro em pavimento betão betuminoso “clássico” (BC) e foram efectuadas medições “in situ” recorrendo-se ao método estatístico de passagem, de modo a aferir os níveis sonoros para os dois tipos de camada de desgaste em estudo, nas condições seco e molhado.

Além do exposto, e dado que o ruído da interação pneu/pavimento se reveste de uma elevada importância, foram efectuadas medições, nos pavimentos em estudo, pelo método do motor desligado. Este método é semelhante ao método estatístico de passagem (SPB), sendo realizado com o motor do veículo de ensaio desligado e em ponto morto. Estes ensaios só foram realizados na condição seco, visto que a norma assim o determina.

Assim, como síntese deste trabalho, e após análise crítica de todos os resultados obtidos nos ensaios efectuados nos trechos rodoviários escolhidos, verificou-se que o pavimento drenante foi o que apresentou níveis de ruído inferiores, em condições secas. Foi também este pavimento que permitiu obter a maior redução de ruído em condições molhadas. O pavimento drenante associado a veículos equipados com pneus de escultura otimizada, proporciona reduções dos níveis de ruído na ordem dos 6 dB(A) para condições secas e 8 dB(A) para condições molhadas.

9.2 Desenvolvimento Futuro

Tendo como base os resultados positivos obtidos, neste estudo, pelo pavimento drenante na redução dos níveis de ruído, constata-se ser possível ainda, haver margem para a optimização destes resultados, com a elaboração e introdução de novos conceitos de Controlo da Qualidade em obra, tendo por base a aferição da porosidade da camada e a monitorização dos níveis de textura em função da frequência.

Ainda neste âmbito, e tendo como princípio o conceito de pavimento “drenante”, estes resultados sugerem o desenvolvimento de estudos económicos de análise da viabilidade, em Portugal, da aplicação de camadas duplamente drenantes (twinlayer), assim como da aplicação de camadas em betão betuminoso de borracha (atendendo à nova directiva de reciclagem de pneus), em meios urbanos e suburbanos. Será ainda indispensável a análise dos custos da construção e, em paralelo, a aferição dos custos de manutenção/exploração com base na durabilidade deste tipo de soluções.

Dada a utilização crescente de pavimentos com borracha em Portugal e face à inexistência de estudos que comprovem a eficácia efectiva deste tipo de pavimentos na redução do ruído, é importante desenvolver-se este estudo. Os resultados constituirão para os gestores da rede rodoviária uma ferramenta essencial no processo análise de soluções alternativas de construção e de reabilitação, que incluam superfícies silenciosas.

O elevado nível de ruído provocado pelos veículos pesados, neste estudo, semelhante para ambos os pavimentos, sugere haver ainda alguma margem para a investigação nesta área específica, quer da indústria automóvel, quer da indústria associada a produção de pneus. De igual forma, e para a realidade portuguesa, poderá ser relevante o controlo e Fiscalização das condições em que este tipo de veículo circula, em particular em rodovias localizadas em meio urbano.

O conceito de pavimento molhado e os métodos de avaliação da sua influência no incremento do ruído não se encontram normalizados. Nos ensaios realizados neste estudo verificou-se que a quantificação da água na estrada (altura de água ou intensidade de precipitação) poderia ter aberto outras perspectivas de análise dos resultados obtidos.

Um possível campo de investigação passará pela análise do ruído em função da intensidade e tempo de precipitação e da capacidade de drenagem do pavimento.

Outro campo de aferição dos resultados poderia passar pela aplicação do método do tambor (ensaio não susceptível a condições climáticas) de modo a estabelecer termos comparativos mais estritos.

Outras contribuições neste domínio devem passar pela integração de métodos de medição de ruído em contínuo, assim como pela determinação de outras propriedades acústicas da superfície habitualmente não observadas, como por exemplo a absorção sonora. Além disso, as medições de ruído deverão ser acompanhadas de uma análise espectral da textura.

A análise dos espectros de frequência, conjuntamente com outros parâmetros que caracterizam os pavimentos, poderá dar indicações quanto ao controlo desses factores em fase de obra. Esse controlo associado à utilização de equipamentos de protecção acústica das rodovias em meio urbano ou suburbano, poderão contribuir para uma redução do ruído de uma forma optimizada, a ter em conta em próximos projectos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbot, P. and Philips, S.**, (1996). *Vehicle Noise Levels Derived from the Statistical Pass-By Method and Road Surface Texture*. Proceedings of the National Conference on Noise Control Engineering (NOISE-CON 96). Bellevue, Washington, USA.
- Anfonso-Lédée F.**, (2001). *The Effect of Temperature on Pass-By Noise*. LCPC, Nantes, France.
- Anfonso-Lédée F.**, (2006). *The Propagation Filter Between CPX and CPB Measurements*. Silvia Project Report, LCPC-006-01-WP2-300404.
- Andersen B., Bendtsen H. and Larsen L.**, (2006). *Acoustic Performance of Low-Noise Road Pavements*. Silvia Project Report, Denmark.
- Attenborough K. and Howarth C.**, (1990). *Models for the Acoustic characteristics of Porous Road Surfaces*. Proceedings of the International Tire/Road Noise Conference. Gothenburg, Sweden.
- Bartolomaeus W.**, (2006). *The Potential of Different Road Surface Designs in Road Traffic Noise Reduction – European Experience on Pavement Influence on Noise (Experiences in Germany)*. Jornadas Técnicas, Madrid 2006.
- Bendtsen H.**, (1998). *Drainage Asphalt and Noise Reduction Over a Long Period*. Euro Noise 1998. Munich.
- Bendtsen H.**, (2006). *Review of existing low noise surfaces*. Technical Conference, Madrid 2006.
- Bendtsen H. and Andersen B.**, (2005). *Noise-Reducing Pavements for Highways and Urban Roads – State of the Art in Denmark*.
- Berengier M.**, (2005). *Detection systems for pavement discontinuities*. Silence European Commission DG Research.
- Bowlby W., Wayson R., Chiguluri S., Martin M. and Herman L.**, (1995). *Interrupted Flow Reference Energy Mean Emission Levels for the FHWA Traffic Model*. Volpe National Transportation Systems Center, U.S.DOT. Cambridge.
- Certiprojecto**, *Avaliação do efeito do pavimento no ruído de Tráfego rodoviário (II)*, Abril 2004.
- Chandler J., Phillips S., Roe P. and Viner H.**, (2003). *Quieter Concrete Roads: Construction, Texture, Skid Resistance and Noise*. TRL Report TRL576.
- Chavet J., Dahbi A., Descornet G., Dhir M. Huschek S., and Leyder J.**, (1987). *Optimization of Surface Characteristics*. Technical Committee Report on Surface Characteristics. XVIIth World Road Congress. Brussels.
- Clapp T.**, (1985). *Correlation of Pavement Texture to Tire Noise and Skid Resistance*. North Carolina State University, School of Engineering.
- CEN/TS 1793-4:2003**. *Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 4: Intrinsic characteristics - In situ values of sound diffraction*. European Committee for Standardization, Brussels.
- CEN/TS 1793-5:2003**. *Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 5: Intrinsic characteristics - In situ values of sound reflection and airborne sound insulation*. European Committee for Standardization, Brussels.
- Costa, E.**, (2003). *Acústica Técnica*. São Paulo: Edgard Blücher.
- Decreto-Lei n.º 292/2000**, de 14 de Novembro. *Regulamento Geral de Ruído*. Diário da República – I Série – A. Portugal.
- Decreto-Lei n.º 72-C/2003**, de 14 de Abril de 2003. *Método para medir o ruído proveniente do contacto dos pneus com o pavimento*. Diário da República - I Série – A. Portugal.
- Decreto-Lei n.º 9/2007**, de 14 de Janeiro. *Regulamento Geral de Ruído*. Diário da República – I Série – A. Portugal.

- Descornet G.**, (2005). *Low-Noise Road Surfaces - European State of the Art*. AAPT2005 Volume74 noise.
- Descornet G. and Goubert L.**, (2006). *Noise Classification of Road Pavements, Task 1: technical background information 1, Draft Report 05*. Directorate-General Environment. European Commission.
- Descornet G. and Sandberg U.**, (1980). *Road Surface Influence on Tire/Road Noise Part II*. Inter-Noise 80, Miami, Florida.
- Design Manual for Roads and Bridges**. HD 36/99, (1999). *Tyre/Road Surface Noise*. Volume 7, Section 5, Chapter 5.
- Domenichi L., Fracassa A., La Torre F., Loprencipe G., Ranzo A., Scalamandre A.**, (1999). *Relationship between Road Surface Characteristics and Noise Emission*. 1º International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction "The Noise Emission", Roma, Italy.
- Donovan P.**, (2005). *Comparative Measurements of Tire/Pavement Noise in European and the United States*, the NITE-study, Illingworth & Rodkin, Inc., prepared for The California Department of Transportation.
- Donovan P. and Oswald L.**, (1980). *The identification and Quantification f Truck Tire Noise Sources Under On-Road Operating Conditions*. Inter-Noise 80. Miami, Florida.
- Ejsmont J., Sandberg U., and Taryma S.**, (1984). *Influence of Tread Pattern on Tire/Road Noise*. SAE Paper N.º 841238, Soc. of Autom. Engin. Warrendale, P.A., USA.
- EN 1793-1:1997**. *Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 1: Intrinsic characteristics of sound absorption*. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1793-2:1997**. *Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 2: Intrinsic characteristics of airborne sound insulation*. European Committee for Standardization, Brussels.
- EN 1793-3:1997**. *Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Part 3: Normalized traffic noise spectrum*. European Committee for Standardization, Brussels.
- FEHRL**, (2006). *Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces*. Brussels, Belgium.
- Franklin R., Harland D. and Nelson P.**, (1979). *Road Surfaces and Traffic Noise*. TRRL Report LR 896. TRL Limited, Crowthorne, UK.
- Fujiwara T., Meiarashi S., Namikawa Y. and Hasebe M.**, (2005). *Noise Reduction Effect of Porfous Elastic Road Surface and Drainage Asphalt Pavement*. Transportation Research Board -TRB 2005 Annual Meeting.
- Gomes L., Seixas P.**, (2006). *Utilização de misturas betuminosas com betume modificado com borracha na obra do IC24, entre Freixo e Alfena*. Seminário LNEC/CRP - Pavimentos rodoviários verdes, Lisboa 2006.
- Gonçalves J.**, (2005). *Características gerais do som*. Brüel & Kjaer.
- Haberl J., Lengheim T, Pucher E., Litzka J., Bendtsen H., Watts G., Parry A., Anfonso-Lédée F., Sandberg U., LeLong J., Hamet J-F., Van Blokland G-J., Kuijipers A., Ejsmont J. and Mioduszewski P.**, (2005). *Integration of Low-Noise Pavements with other Noise Abatement Measures*. SILVIA-TUW-052-04-WP5-220305.
- Hanson D., Donovan P. and James R.**, (2005). *Tire/Pavement Noise Characteristics of HMA Pavements*. Symposium.
- Hamet J-F., Klein P., Antosso F., Duhamel D., Fadari A. and Béguet B.**, (2000). *Road Profile Textura and Tire Noise. Pavement Surface Characteristic*. IV th International Symposium – SURF 2000. Nantes.
- Harris C.**, (1979). *Handbook of Noise Control*. McGraw-Hill.
- Hofman R.**, (2006). *Porous Asphalt, Dutch Experience*. IPG, Noise Innovation Program. Jornadas Técnicas, CEDEX, silent pavements.
- Jiménez F.**, (2006). *Medidas de Ruido de Pavimentos en Condiciones Seco y Mojado*. Jornadas Técnicas – Incidencia de la capa de rodadura en la reducción del ruido del tráfico. Madrid 2006.
- Kiely G.**, (1999). *Ingenieria Ambiental, Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Mc Graw Hill.

- Koklanaris M.**, (1998). *Sticking with Rosan*. U.S. Department of Transportation. Public Roads.
- Kuijpiers A. and Van Blokland G.**, (2001). *Tyre/Road Noise Models in the Last Two Decades: a Critical Evaluation*. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Hague, Netherlands.
- Mancosu F.**, (1999). *TINO Project: an Overview*. 1º International Colloquium on Vehicle Tyre Road Interaction “The Noise Emission”, Roma, Italy.
- McDaniel R. and Thornton W.**, (2004). *Field Evaluation of a Porous Friction Course for Noise Control*. Transportation Research Board -TRB 2005 Annual Meeting.
- Morgan P.**, (2006). *Performing static and dynamic measurements of the absorption coefficient of low- noise road surfaces using the extended surface method*. Silvia Project Report, TRL-007-05-WP2-010405.
- Nelson P. and Abbot P.**, (1990). *The Acoustical Performance of Previous Macadam Surfaces for High Speed Roads*. Transportation Research Record, National Research Council N.º 1265., Washington, USA.
- Newcomb D., Buncher M. and Huddleston I.J.** (2001). Concepts of Perpetual Pavements. Transportation Research Circular N.º 503. Transportation Research Board. Washington, USA.
- Nilson N.-A., Bennerhult O. and Soderqvist S.**, (1980). *External Tire/Road Noise: It's Generation and Reduction*. Inter-Noise 80. Miami, Florida.
- Nilsson R., Nordlander J.-O., Sliwa N. and Contributors**, (2005). *Design Guidelines for Durabel, Noise Reducing Pavement*. Silvia Project Deliverable, SILVIA SKANSKA-018-01-WP4-231105.
- Noda E., Ito H., Nakaniski H., Koie T. and Hamada K.**, (1998). *First experience of noise reducing exposed small aggregate concrete surfaces in Japan*. 8th International Symposium on Concrete Roads, Lisbon.
- Norma ASTM E 303-93**. *Standard Test Method for Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester*.
- Norma ISO 4223-1:2005**. *Definições de alguns termos usados na indústria dos pneus*. Parte 1: Pneus pneumáticos.
- Norma ISO 11819-1: 1997**. *Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: Statistical Pass-By Method*. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland.
- Norma ISO 11819-2: 2000**. *Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on traffic noise – Part 2: The Close Proximity Method*. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland.
- Norma ISO/DIS 13325: 2001**. *Tyres-Coast-By-Method for Measurement of Tyre/Road Sound Emission*. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland.
- Norma ISO 13472-1: 2002**. *Acoustics – Measurement of Sound Absorption Properties of Road Surfaces In Situ: Extend Surface Method*. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland.
- Norma ISO 13473-1: 1997**. *Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 1: Determination of Mean Profile Depth*. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland.
- Norma ISO/CD 13473-4**. *Characterization of pavement texture by use of surface profiles - Part 4: Spectral analysis of texture profiles*. International Organisation for Standardisation (ISO). Geneve, Switzerland.
- Norma NF S31-119-2: 2000**. *Acoustique – Caractérisation in situ des qualités acoustiques des revêtements de chaussées – Mesurages acoustiques au passage – partie 2: Procédure véhicule maîtrisé*. Association Française de Normalisation (AFNOR). Paris.
- Norma NLT 327/88**. *Permeabilidad in situ de pavimentos drenantes con el permeámetro LCS*.
- Norma NLT 335/87**. *Medida de la Textura Superficial por el Método del Circulo de Arena*.
- Patterson P.**, (1968). *The pneumatic tyre. Chapter 2 in “Steering, suspension and tyres”*. Edited by J.G. Giles, Iliffe Books, Lda. London.

- Pereira P., Picado-Santos L.**, (2002). *Pavimentos Rodoviários*. Editado por Paulo Pereira e Luís Picado Santos. Braga.
- Branco F., Pereira P., Picado-Santos L.**, (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Edições Almedina
- Phillips S., Waters-Fuller T., Balsom M.**, (1998). *Factors Affecting Statistical Pass-By Measurements*. Internoise 98. Christchurch, New Zealand.
- Phillips S. and Kinsey P.**, (2001). *Aspects of Vehicle and Traffic Noise Control*. UBA Workshop-Further Noise Reduction for Motorised Road Vehicles. Berlin 2001, Germany.
- Phillips S. and Abbott P.**, (2001). *Factors Affecting Statistical Pass-By Measurements*. Proceedings of Inter-Noise 2001, Hague, Netherlands.
- Phillips S., Kollamthodi S., Nelson P. and Abbott P.**, (2003). *Study of Medium and High Speed Tyre/Road Noise*. Project Report PR/SE/849/03. TRL Limited December 2003.
- PIARC**, (1991). *Technical Committee on Surface Characteristics Report*. PIARC 19th World Congress, Marrakech.
- Prowell B. and Hanson D.**, (2005). *Evaluation of Circular Texture Meter for Measuring Surface Texture of pavements*. 84th Annual Meeting of Transportation Research Board. Washington.
- Pucher E., Litzka J., Haberl J., Girard J., Ejsmont J., Lelong J. Hamet J-F., Sandberg U., Bendtsen H., Watts G., Parry A., Blockland G., Kuijpers A.**, (2006). *Recommendations on Specifications for Tyre and Vehicle Requirements*. Silvia Project Report, TUW-039-02-WP5-120304.
- Raaberg J., Schmidt B. and Bendtsen H.**, (2001). *Technical Performance and Long-Term Noise Reduction of Porous Asphalt Surfaces*. Road Directorate, Danish Road Institute.
- Raitanen N.**, (2005). *Measuring of Noise and Wearing of Quiet Surfaces*. Dissertation for the degree of Doctor of Science in Technology. Finland.
- Roo F. and Noordhoek I.**, (2004). *Harmonoise Reference Model – General Principles and Development*. The 33th international Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Praga, República Checa.
- Rossing T., Moore R., Wheeler P.**, (2002). *The Science of Sound*, Third Edition. Addison Wesley.
- Rymer B. and Donovan P.**, (2005). *Tire/Pavement Noise Intensity Testing in Europe: The NITE Study and Its Relationship to Ongoing Caltrans Quiet Pavement Activities*. AAPT2005volume74 noise.
- Saemann E.-U.**, (2006). *Noise Reduction by Intelligent Materials – The IP InMAR*. Transport Research Arena Europe 2006. Continental, Germany.
- Sainio P.**, (2003). *NOTRA – Noise Trailer in Pavement Evolution Measurements*. Helsinki University of Technology.
- Sandberg U.**, (1996). *Design and Maintenance of Low Noise Road Surfaces: Third International Symposium on Surfaces Characteristics*. Christchurch, New Zealand.
- Sandberg U.**, (2001). *Tyre/Road Noise – Myths and Realities*. The 2001 International Congress and Exhibition on Noise Control Engineering. Hague, Netherlands.
- Sandberg U.**, (2006). *SILENCE, Presentation at SP C Meeting at Bast, WP C4: Legislation-related issues*. Bergisch-Gladbach, Germany.
- Sandberg U. and Descornet G.**, (1980). *Road Surface Influence on Tyre/Road Noise – Parts I and II*. Proceedings of Inter-Noise 80. Miami, Florida, USA.
- Sandberg U. and Ejsmont J.**, (2002). *Tyre/Road Noise Reference Book*. Informex, SE-59040 Kisa, Sweden.
- Sandberg U. and Kalman B.**, (2005). *The Poroelastic Road Surface – Results of an Experimental in Stockholm*. Silvia Project Report, SILVIA-VTI-006-00-WP4-030605.
- Sanz J.**, (2006). *Evaluación del Ruido de Rodadura en Carreteras*. UCLM, Ciudad Real.
- Silva P. M.**, (1978). *Acústica de Edifícios*. Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Swanlund M., (2005). *Quiet Pavement Scan and Implementation Activities*. Symposium.

Von Meier A., Van Blokland G. and Heerkens J., (1990). *Noise Optimized Road Surfaces and Further Improvements by Tyre Choice*. Proceedings of the International Tire/Noise Conference 1990. Gothenburg, Sweden.

Watts G., (2005). *Harmonaise Prediction Model for Road Traffic Noise*. Published Project Report PPR034. TRL Limited July 2005.

Wayson R., (1998). *NCHRP - Synthesis of Highway Practice 268, Relationship Between Pavement Surface Texture and Highway Traffic Noise*. Transportation Research Board. Washington, D.C..

www.ruidos.org/documentos/sonometros.html

www.inventors.about.com/library/inventors/bltires.htm

www.michelintransport.com

www.braziltires.com.br

ANEXOS

ANEXO I

DECRETO-LEI N.º 9/2007 DE 17 DE JANEIRO

CONCEITOS:

- a) **Aglomeraco** – um município com uma populao residente superior a 100 000 habitantes e uma densidade populacional igual ou superior a 2500 habitantes por quilmetro quadrado;
- b) **Avaliao** – a quantificao de um indicador de ruído ou dos efeitos prejudiciais a ele associados;
- c) **Efeitos prejudiciais** – os efeitos nocivos para a saúde e bem-estar humanos;
- d) **Grande infra-estrutura de transporte aéreo** – o aeroporto civil, identificado pelo Instituto Nacional de Aviao Civil, onde se verifiquem mais de 50 000 movimentos por ano, considerando-se um movimento uma aterragem ou uma descolagem, salvo os destinados exclusivamente a acoes de formao em aeronaves ligeiras;
- e) **Grande infra-estrutura de transporte ferroviário** – o troço ou troços de uma via férrea regional, nacional ou internacional, identificados pelo Instituto Nacional de Transporte Ferroviário, onde se verifiquem mais de 30 000 passagens de comboios por ano;
- f) **Grande infra-estrutura de transporte rodoviário** – o troço ou troços de uma estrada municipal, regional, nacional ou internacional, identificados por um município ou pela EP—Estradas de Portugal, E. P. E., onde se verifiquem mais de três milhões de passagens de veículos por ano;
- g) **Indicador de ruído** – um parâmetro físico-matemático para a descrio do ruído ambiente que tenha uma relao com um efeito prejudicial;
- h) **L_d (indicador de ruído diurno)** – o indicador de ruído associado ao incmodo durante o período diurno.  equivalente a L_{day} ;
- i) **L_{den} (indicador de ruído diurno-entardecer-nocturno)** – o indicador de ruído associado ao incmodo global, conforme especificado mais a frente;
- j) **L_e (indicador de ruído do entardecer)** – o indicador de ruído associado ao incmodo durante o período do entardecer.  equivalente a $L_{evening}$;
- k) **L_n (indicador de ruído nocturno)** – o indicador de ruído associado a perturbaoes do sono.  equivalente a L_{night} ;
- l) **Mapa estratégico de ruído** – um mapa para fins de avaliao global da exposio ao ruído ambiente exterior, em determinada zona, devido a várias fontes de ruído, ou para fins de estabelecimento de previsoes globais para essa zona;
- m) **Planeamento acústico** – o controlo do ruído futuro, através da adopo de medidas programadas, tais como o ordenamento do território, a engenharia de sistemas para a gestão do tráfego, o planeamento da circulao e a reduo do ruído por medidas adequadas de isolamento sonoro e de controlo do ruído na fonte;
- n) **Planos de aco** – os planos destinados a gerir o ruído no sentido de minimizar os problemas dele resultantes, nomeadamente pela reduo do ruído;

- o) **Relação dose-efeito** – a relação entre o valor de um indicador de ruído e um efeito prejudicial;
- p) **Ruído ambiente** – um som externo indesejado ou prejudicial gerado por actividades humanas, incluindo o ruído produzido pela utilização de grandes infra-estruturas de transporte rodoviário, ferroviário e aéreo e instalações industriais, designadamente as definidas no anexo I do Decreto-Lei n.º 194/2000, de 21 de Agosto, com as alterações introduzidas pelos Decretos-Leis n.ºs 152/2002, de 23 de Maio, 69/2003, de 10 de Abril, 233/2004, de 14 de Dezembro, e 130/2005, de 16 de Agosto;
- q) **Valor limite** – o valor de L_{den} ou de L_n que, caso seja excedido, dá origem à adopção de medidas de redução do ruído por parte das entidades competentes;
- r) **Zona tranquila de uma aglomeração** – uma zona delimitada pela câmara municipal, no âmbito dos estudos e propostas sobre ruído que acompanham os planos municipais de ordenamento do território, que está exposta a um valor de L_{den} igual ou inferior a 55 dB(A) e de L_n igual ou inferior a 45 dB(A), como resultado de todas as fontes de ruído existentes;
- s) **Zona tranquila em campo aberto** – uma zona delimitada pela câmara municipal, no âmbito dos estudos e propostas sobre ruído que acompanham os planos municipais de ordenamento do território, que não é perturbada por ruído de tráfego, de indústria, de comércio, de serviços ou de actividades recreativas.

ANEXO II

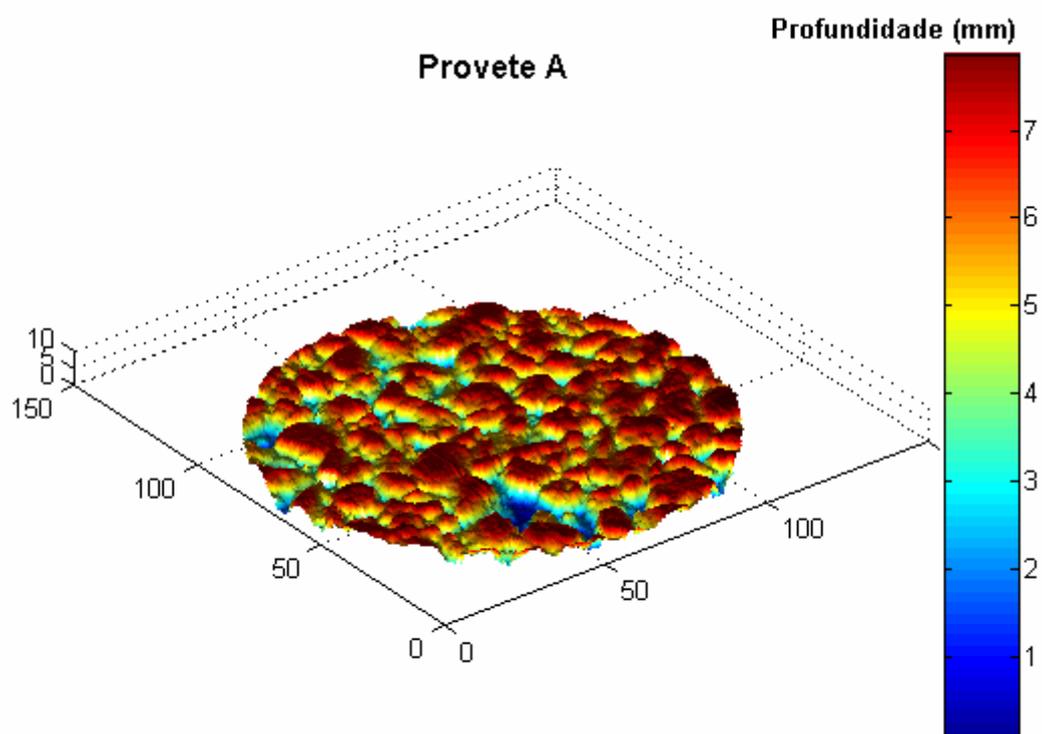


Figura II.1 – Aspecto da superfície (provete A)

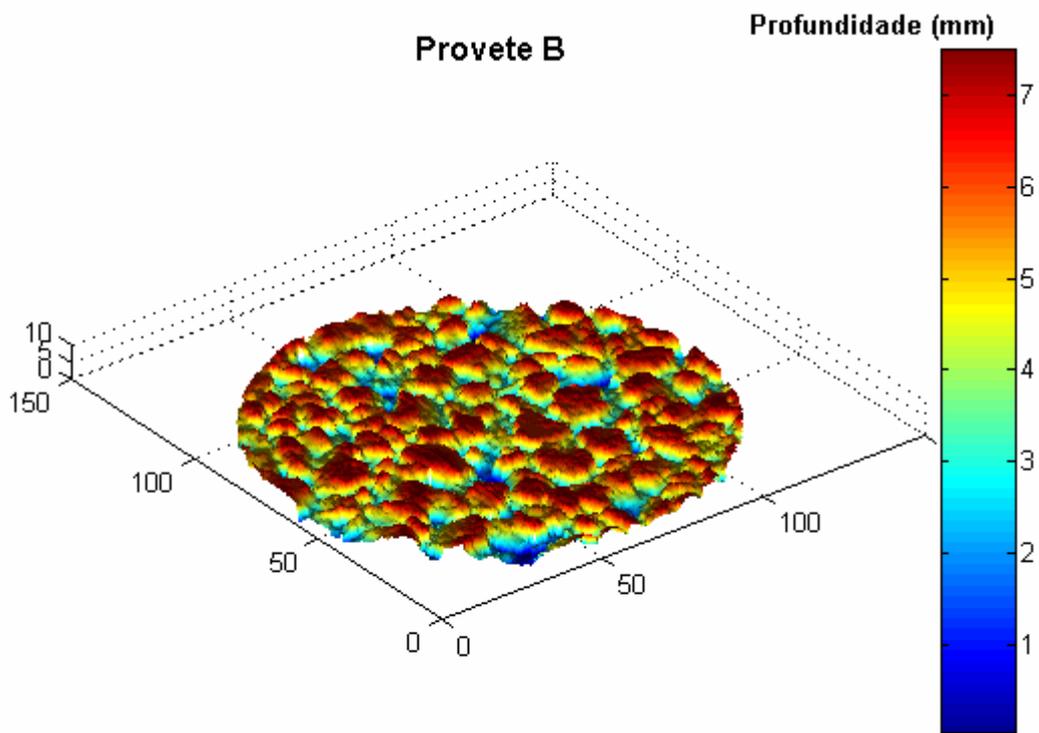


Figura II.2 – Aspecto da superfície (provete B)

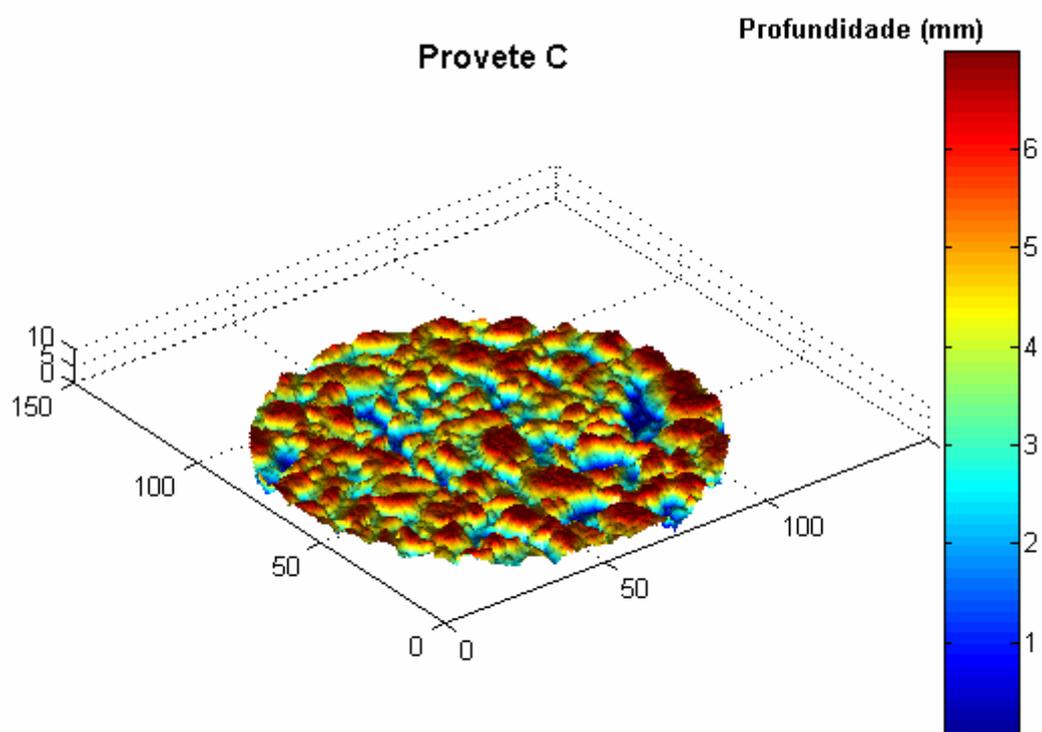


Figura II.3 – Aspecto da superfície (provete C)

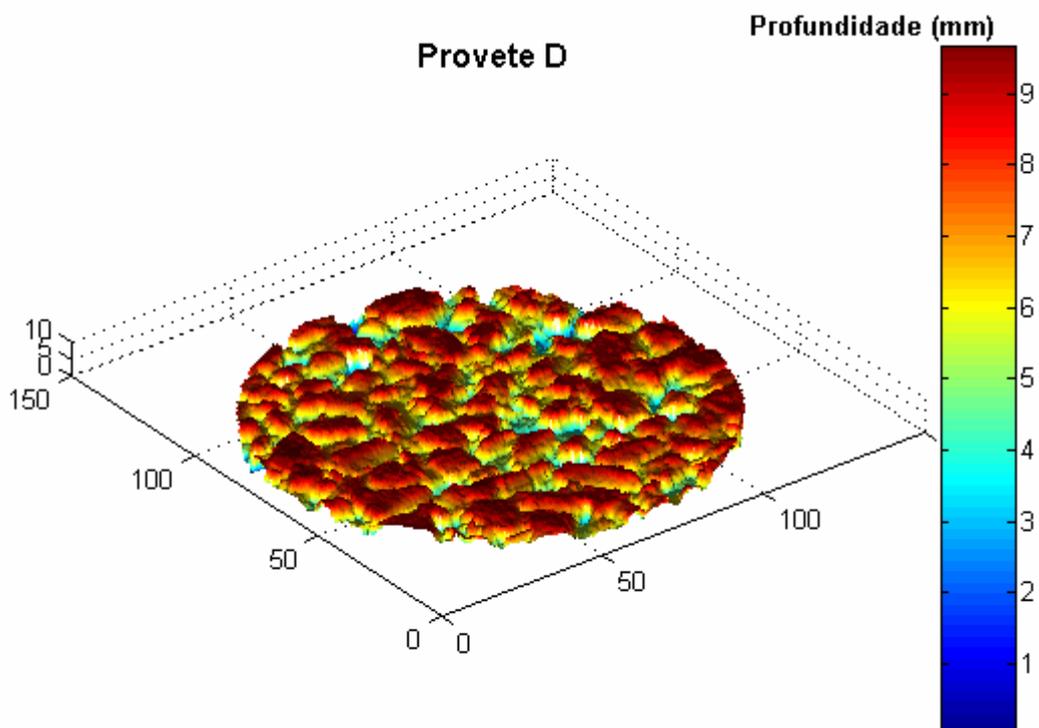


Figura II.4 – Aspecto da superfície (provete D)

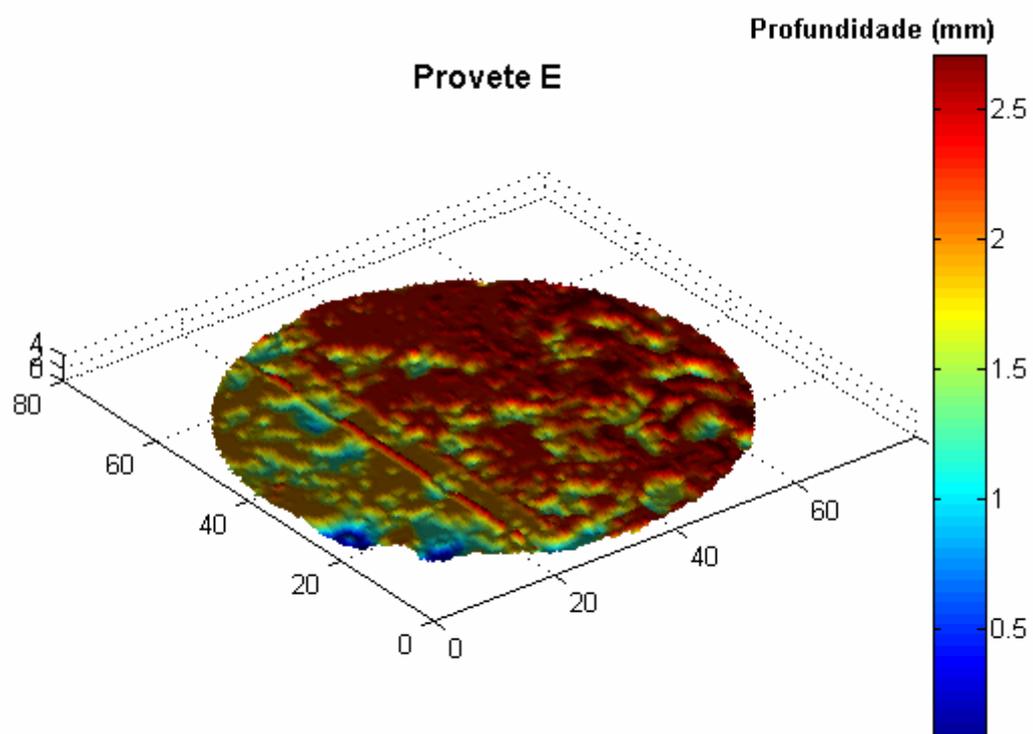


Figura II.5 – Aspecto da superfície (provete E)

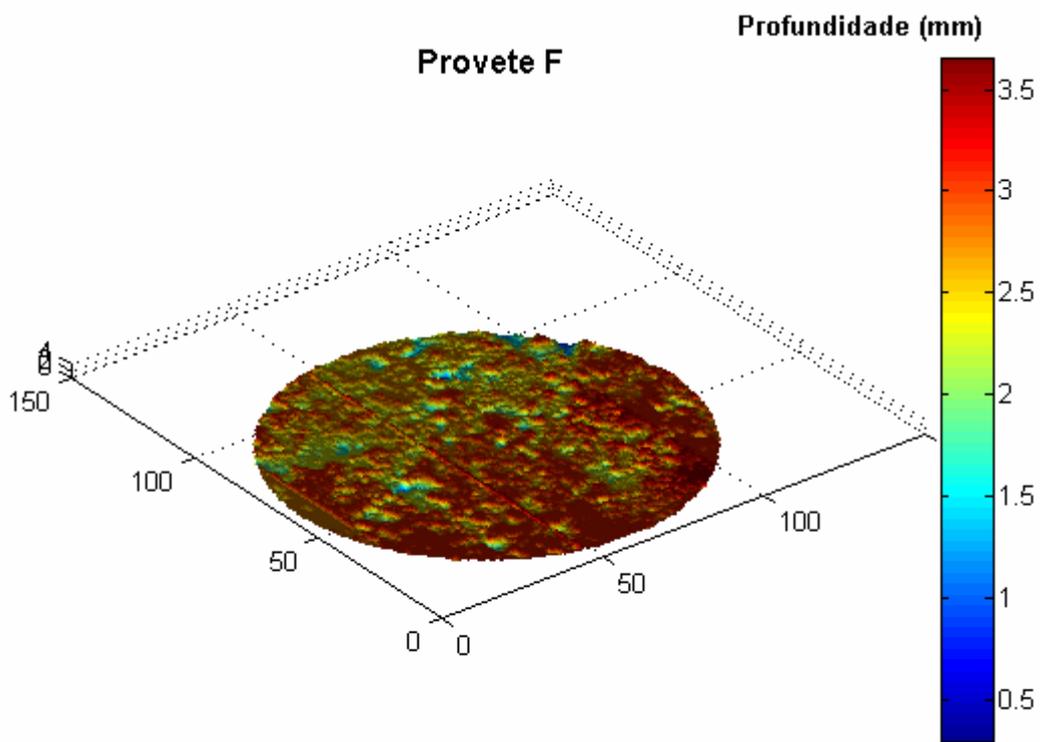


Figura II.6 – Aspecto da superfície (provete F)

ANEXO III

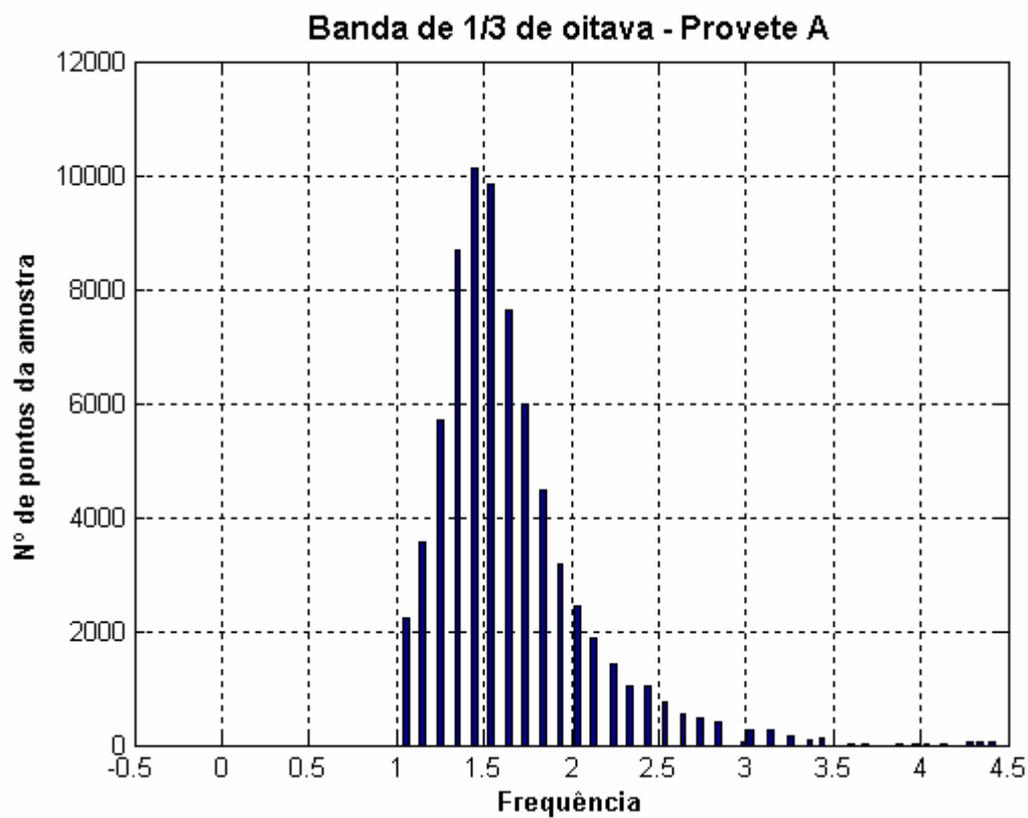


Figura III.1 – Número de pontos da amostra em função da frequência (provete A)

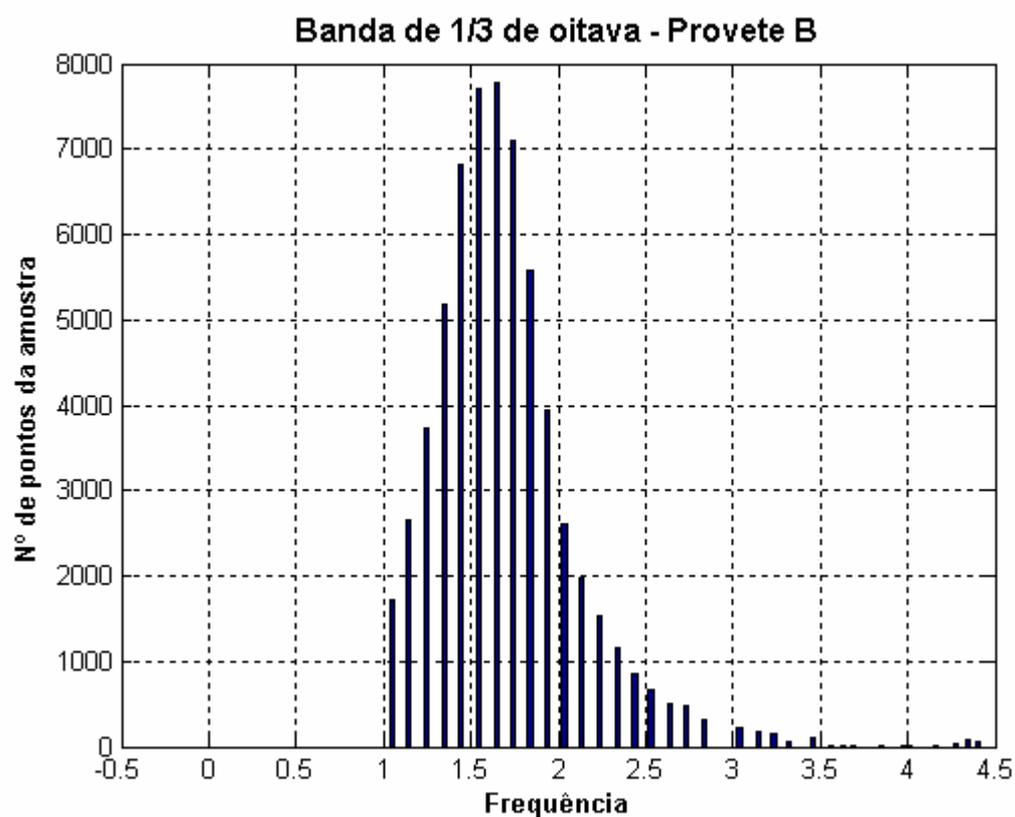


Figura III.2 – Número de pontos da amostra em função da frequência (provete B)

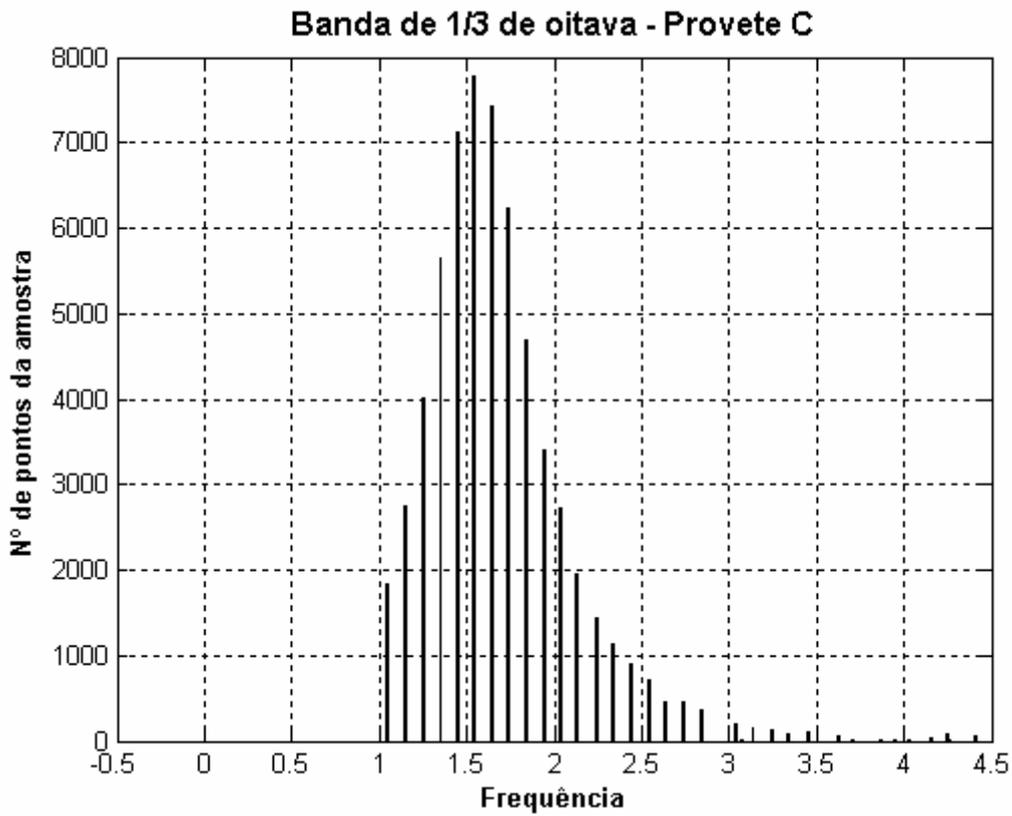


Figura III.3 – Número de pontos da amostra em função da frequência (provete C)

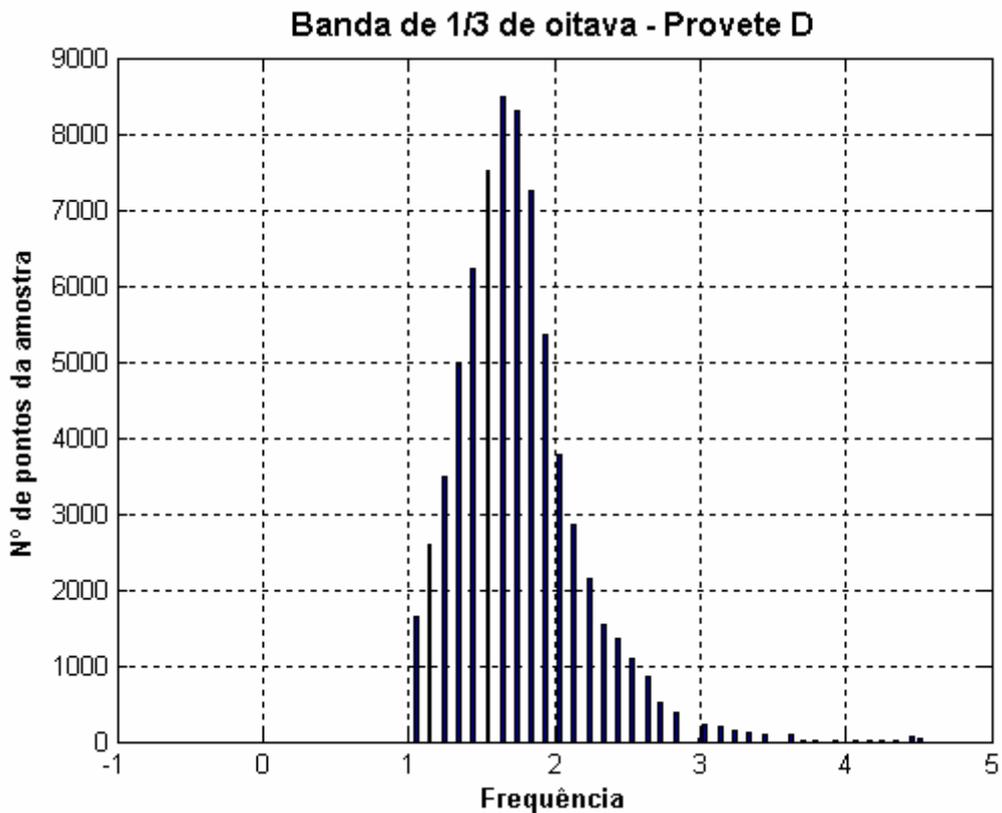


Figura III.4 – Número de pontos da amostra em função da frequência (provete D)

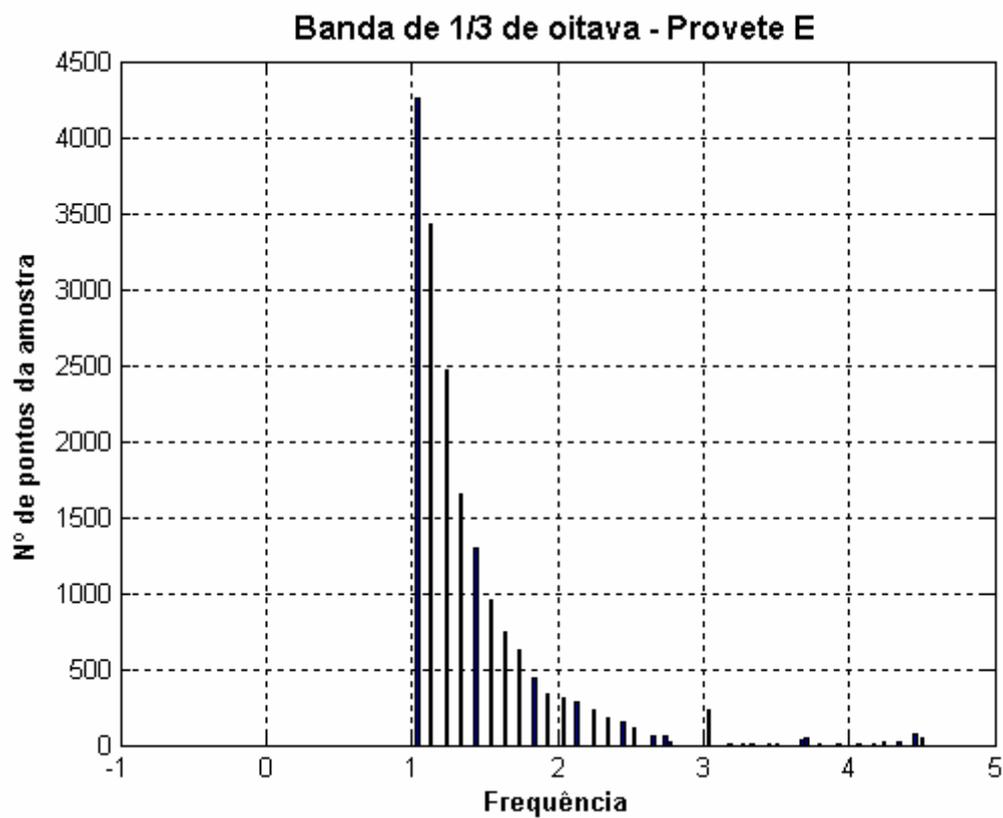


Figura III.5 – Número de pontos da amostra em função da frequência (provete E)

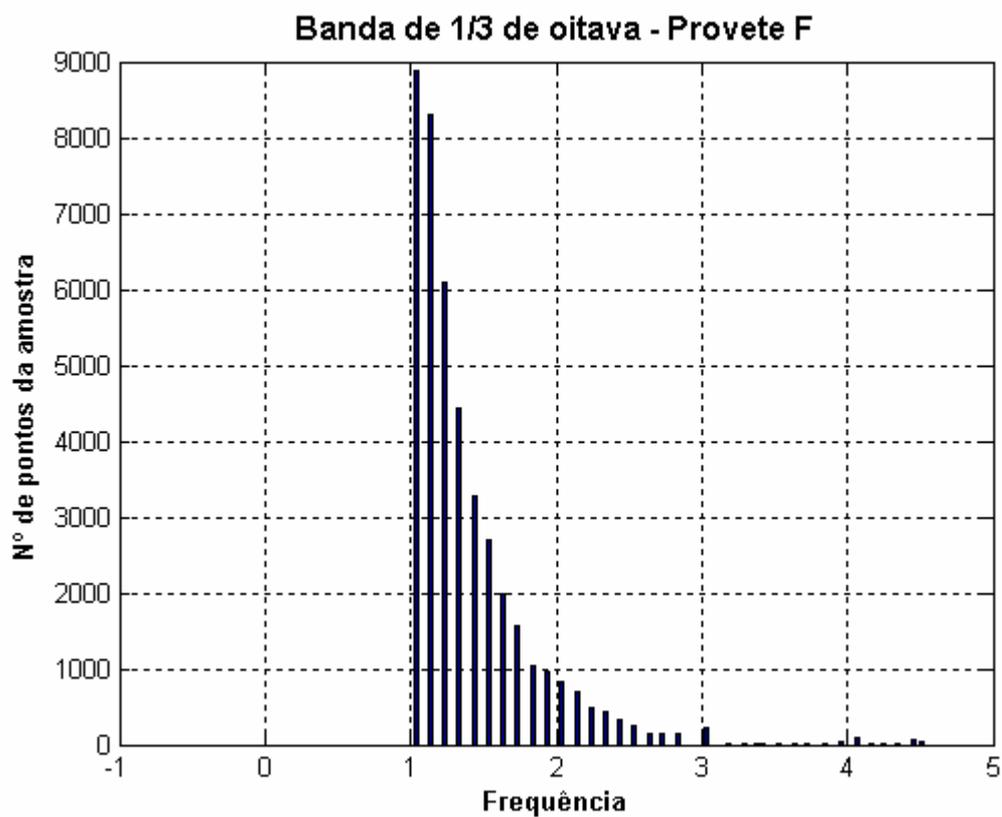


Figura III.6 – Número de pontos da amostra em função da frequência (provete F)

ANEXO IV

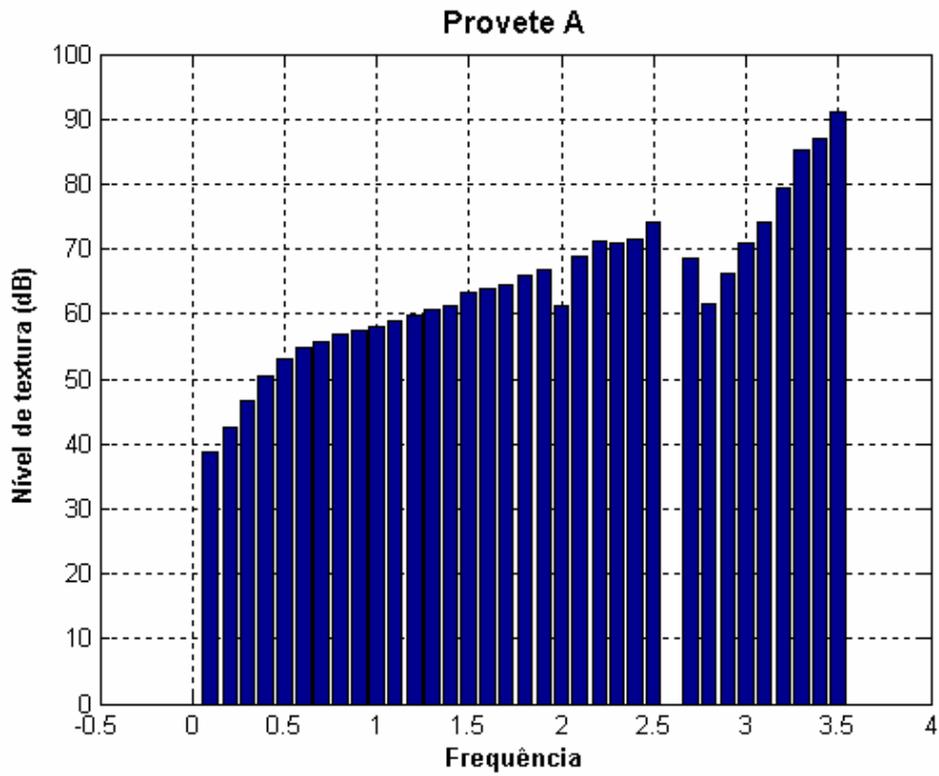


Figura IV.1 – Nível de textura em função da frequência (provete A)

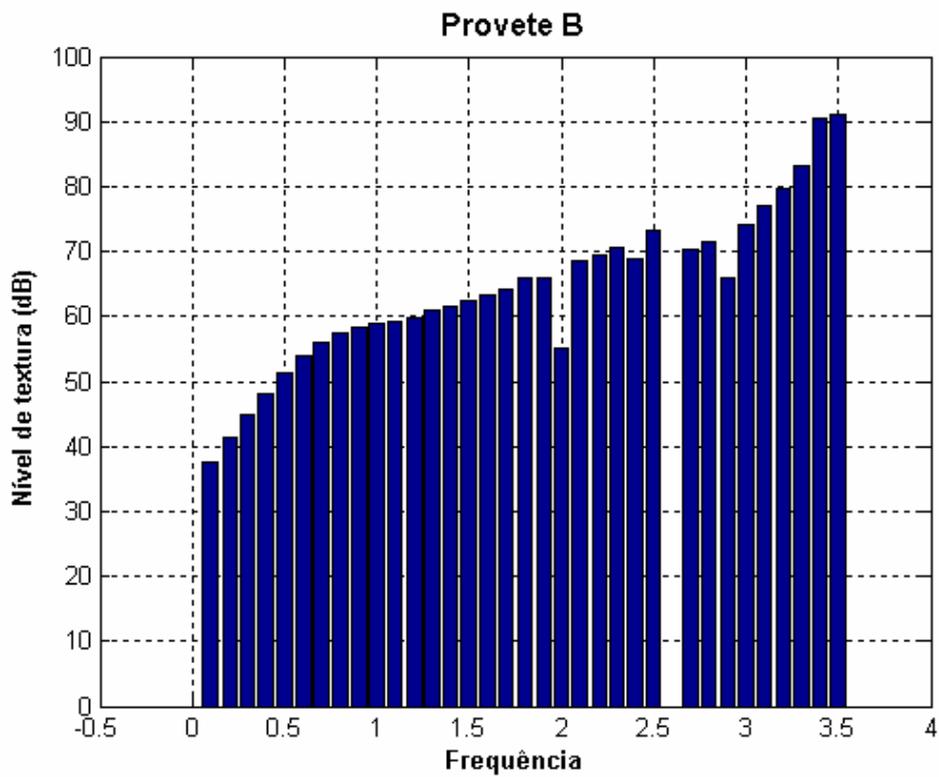


Figura IV.2 – Nível de textura em função da frequência (provete B)

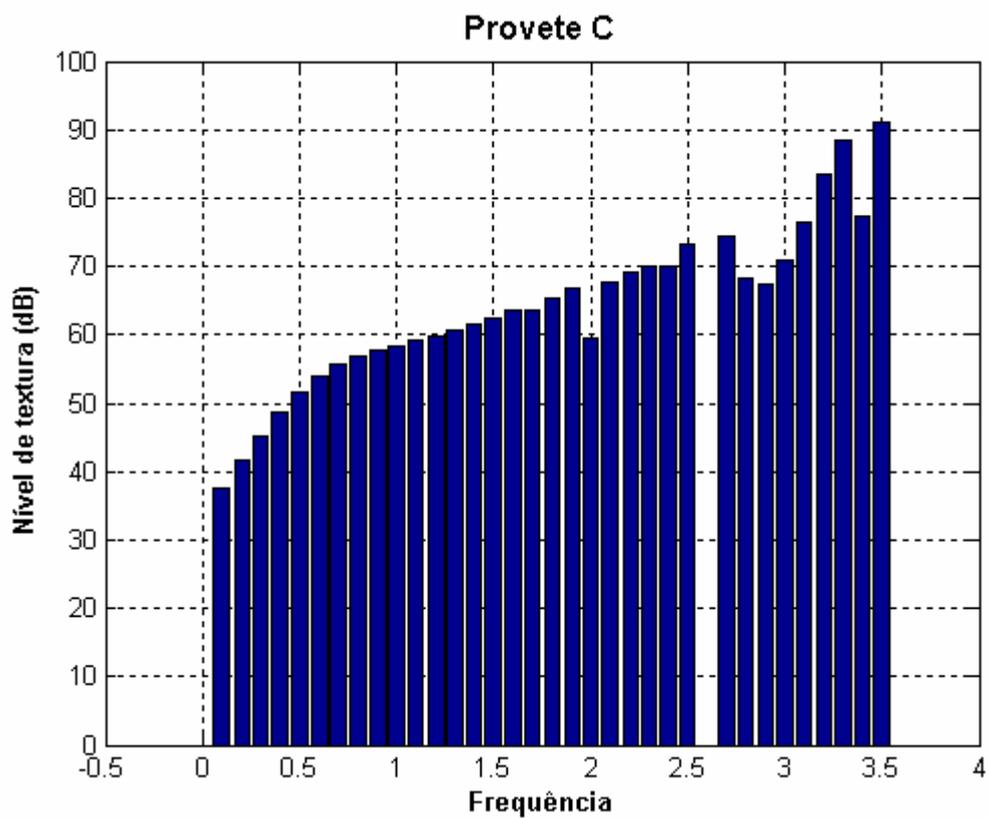


Figura IV.3 – Nível de textura em função da frequência (provete C)

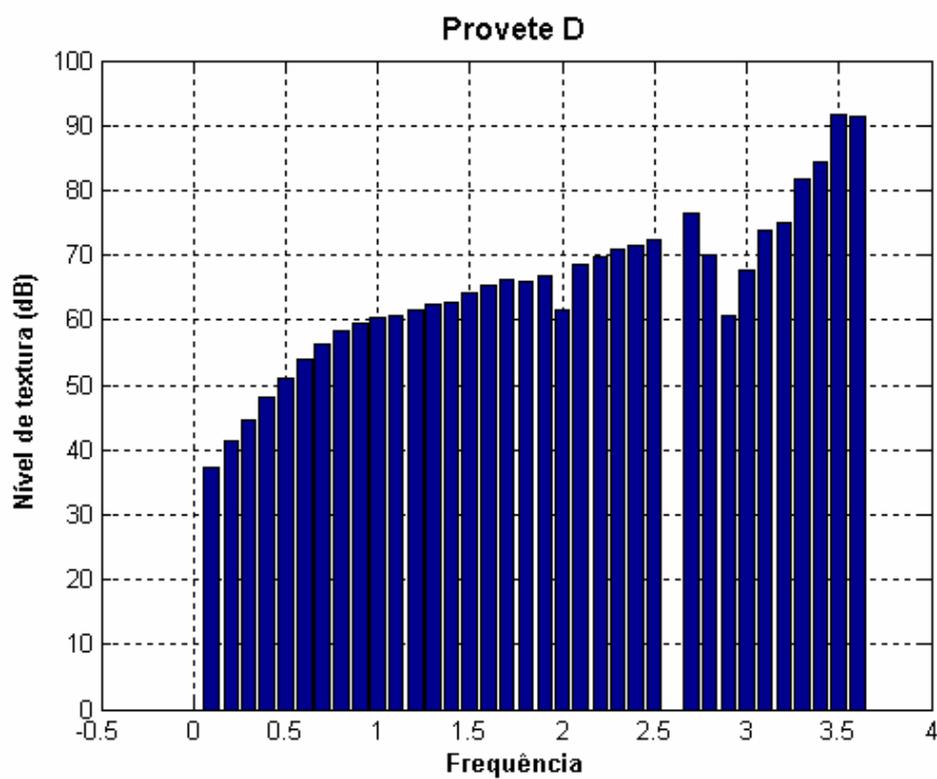


Figura IV.4 – Nível de textura em função da frequência (provete D)

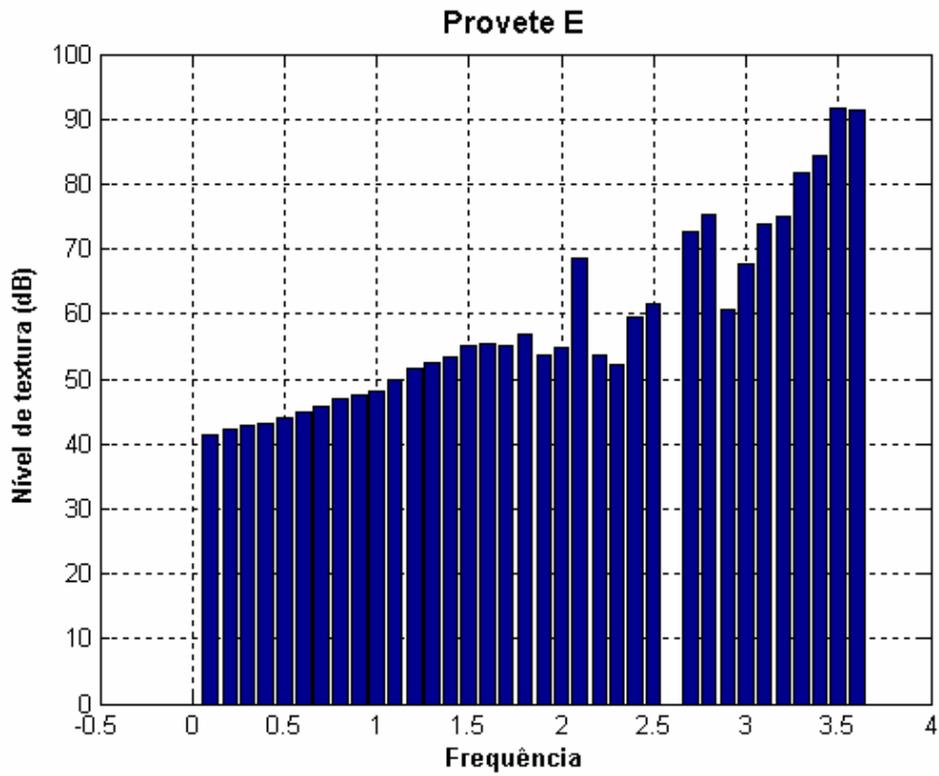


Figura IV.5 – Nível de textura em função da frequência (provete E)

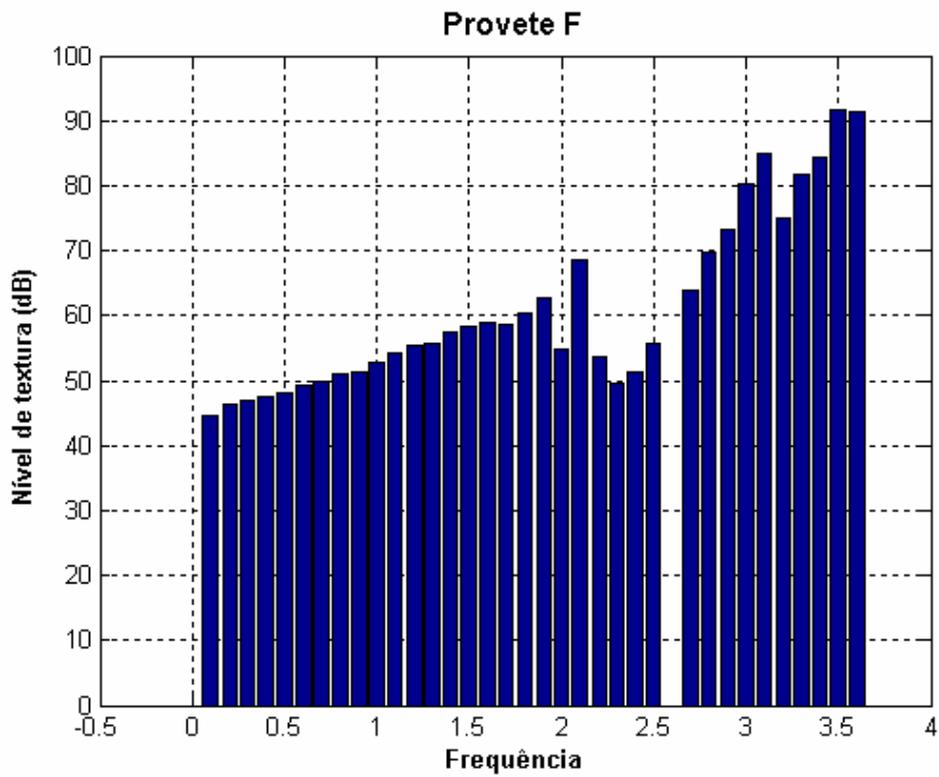
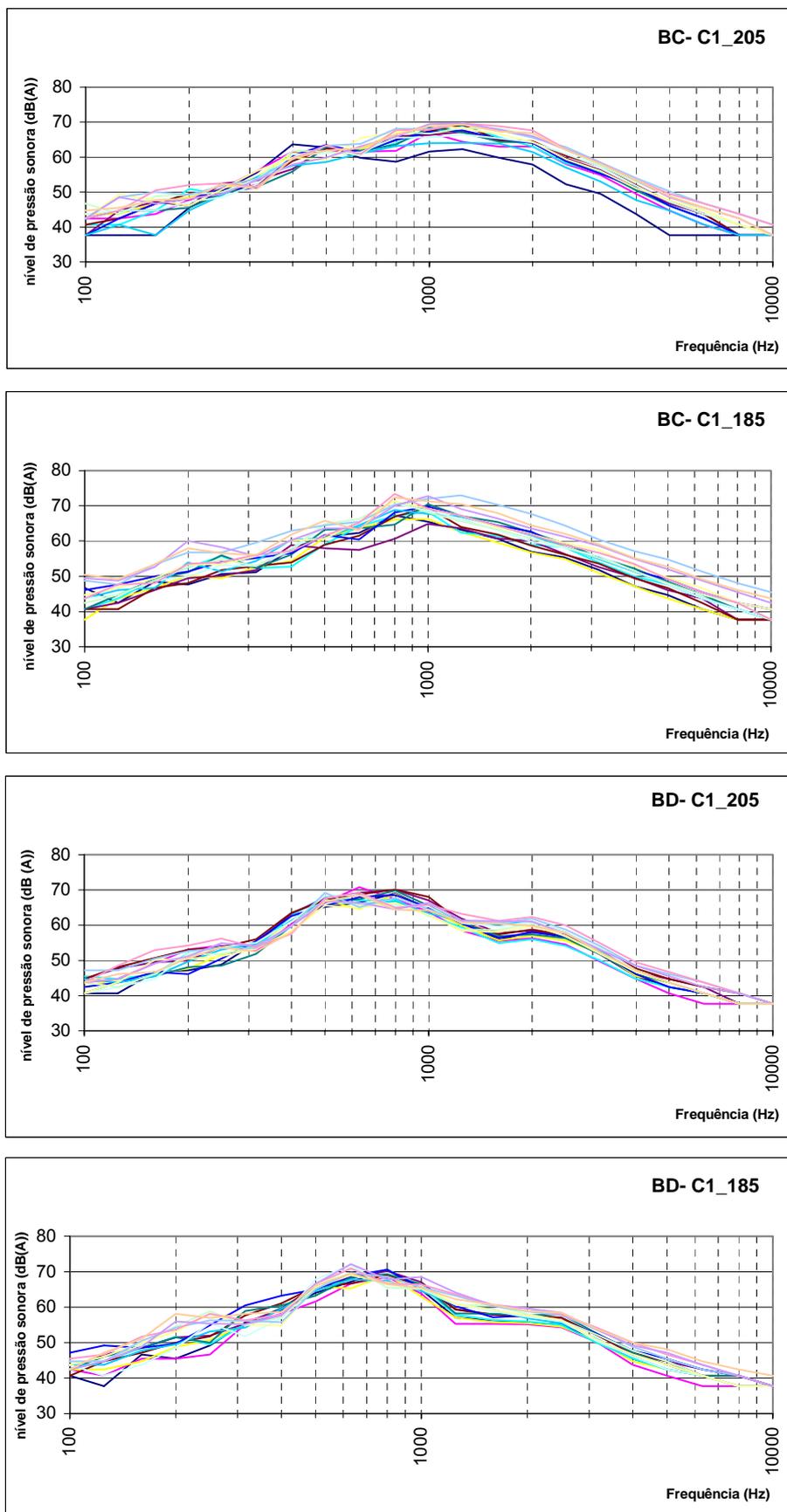


Figura IV.6 – Nível de textura em função da frequência (provete F)

ANEXO V

ANEXO VI

Figura VI.1 – Espectros de frequência para os pneus C1_205 e C1_185 e para os pavimentos em estudo, drenante (BD) e clássico (BC)



ANEXO VII

Figura VII. 1 – Níveis sonoros para os veículos ligeiros a velocidades médias, na condição seco

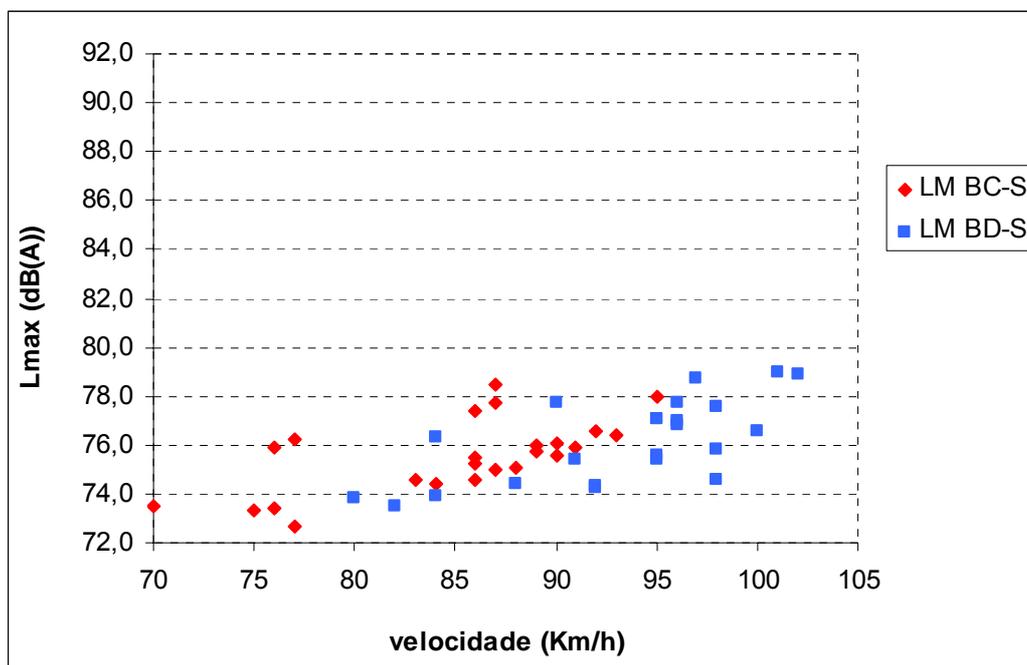


Figura VII. 2 – Níveis sonoros para os veículos ligeiros a velocidades médias, na condição molhado.

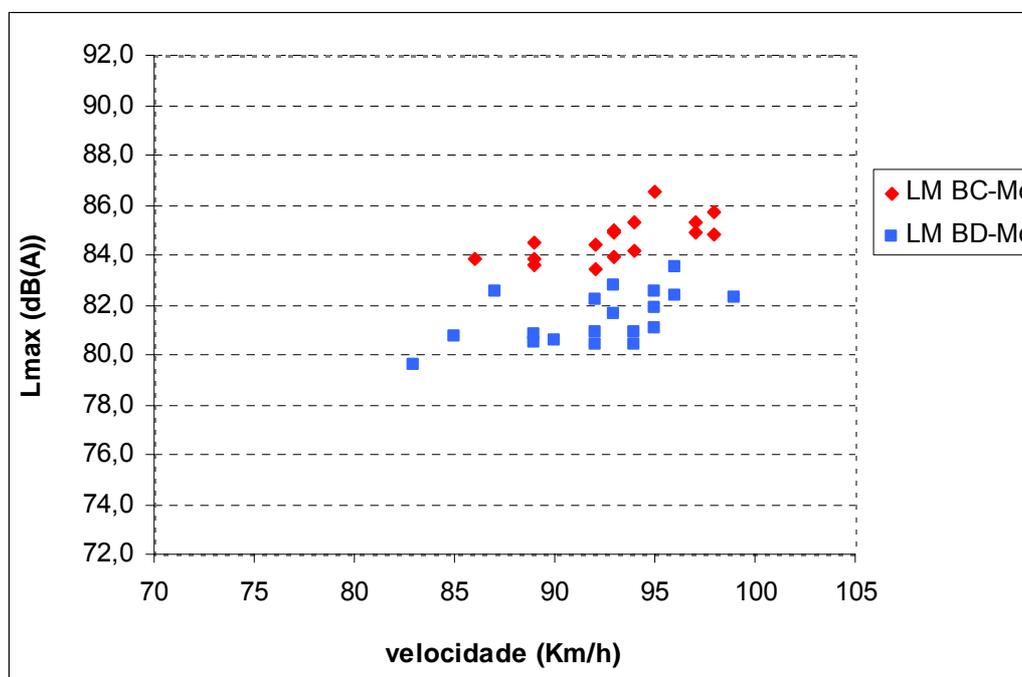


Figura VII. 3 – Níveis sonoros para os veículos pesados (2 eixos) a velocidades médias, na condição seco.

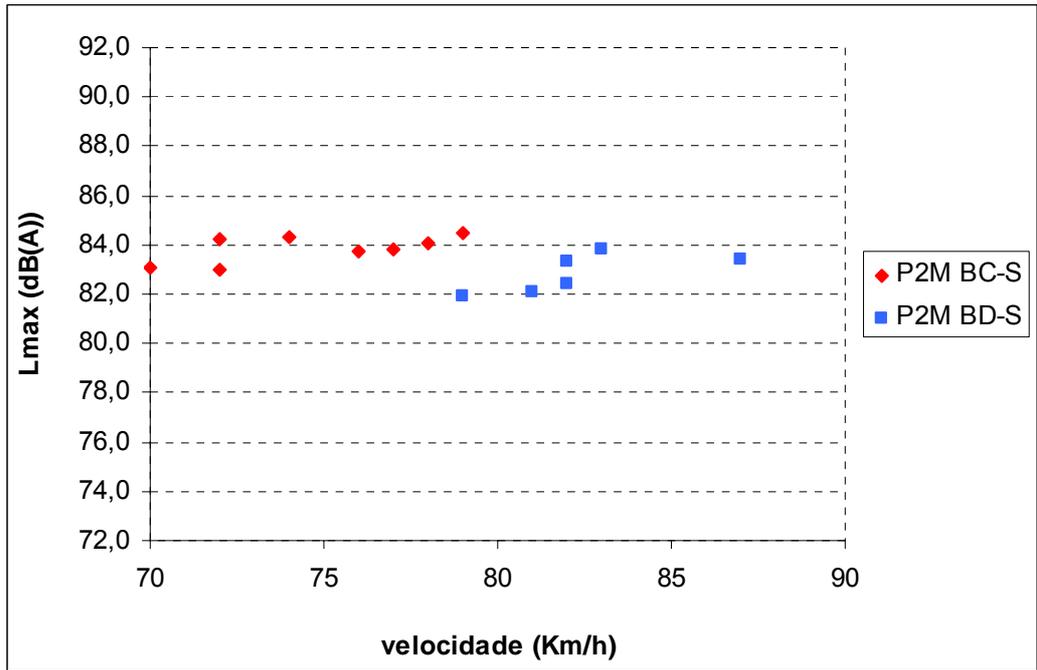


Figura VII. 4 – Níveis sonoros para os veículos pesados (2 eixos) a velocidades médias, na condição molhado.

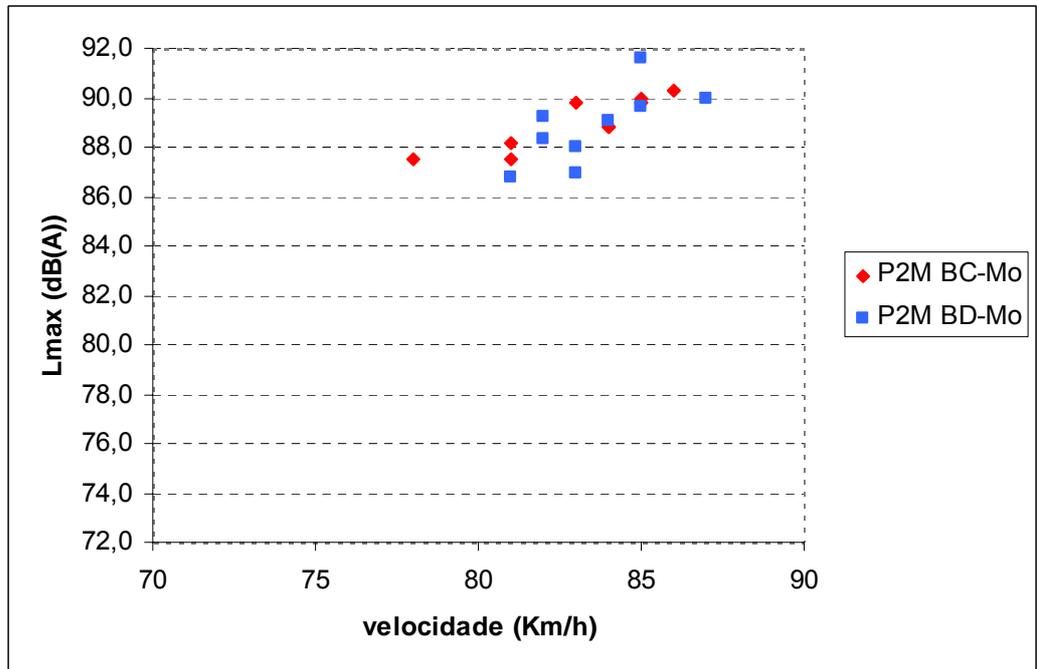


Figura VII. 5 – Níveis sonoros para os veículos pesados (3 eixos) a velocidades médias, na condição seco.

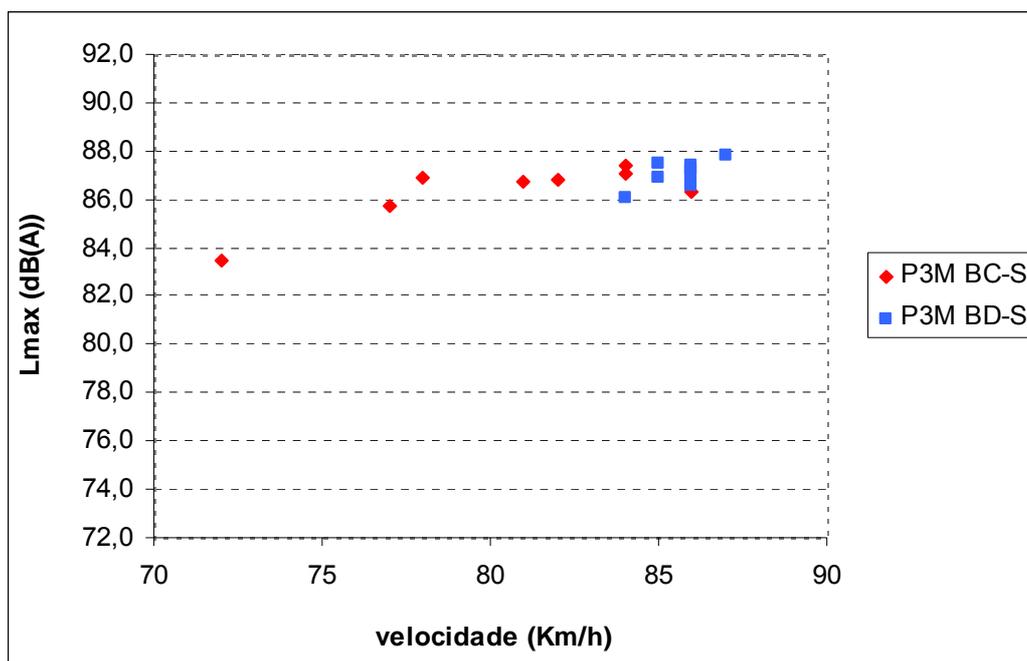


Figura VII. 6 – Níveis sonoros para os veículos pesados (3 eixos) a velocidades médias, na condição molhado.

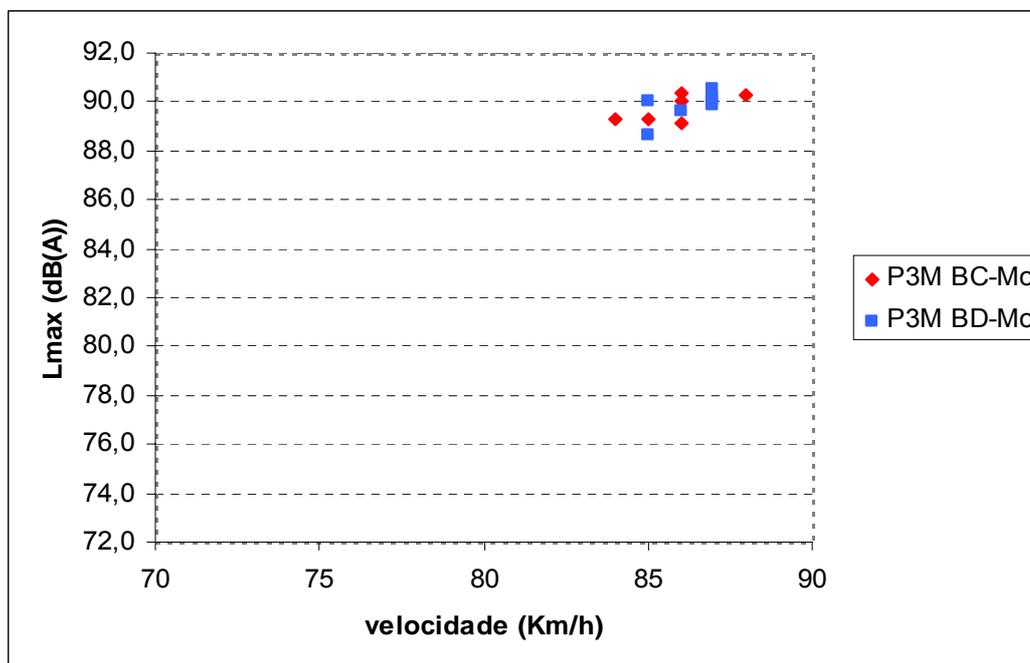


Figura VII. 7 – Níveis sonoros para os veículos ligeiros a velocidades altas, na condição seco.

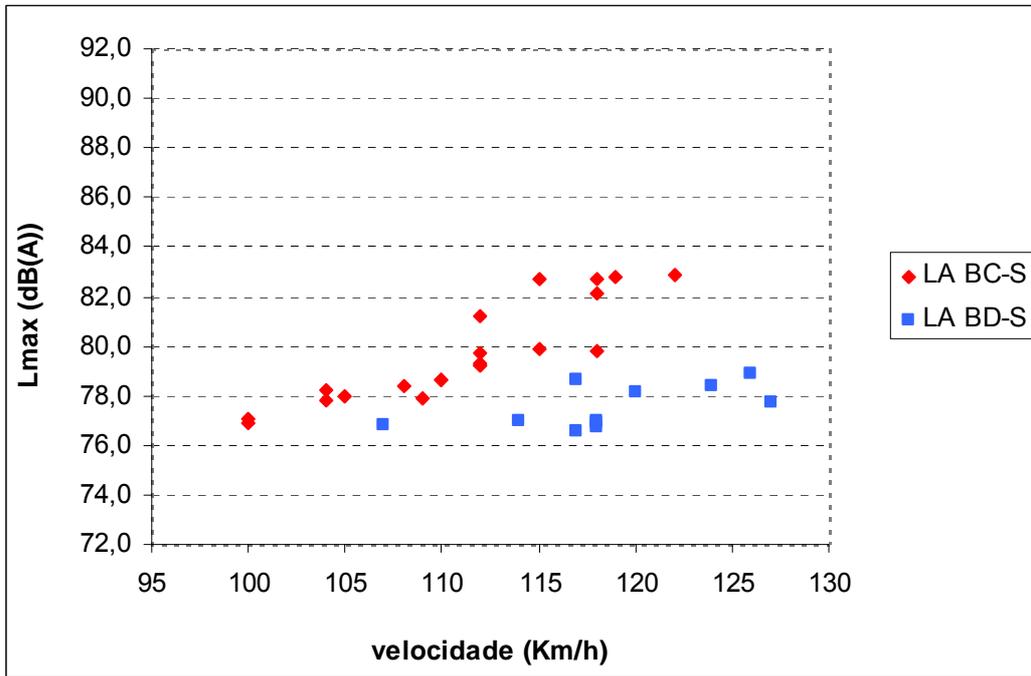
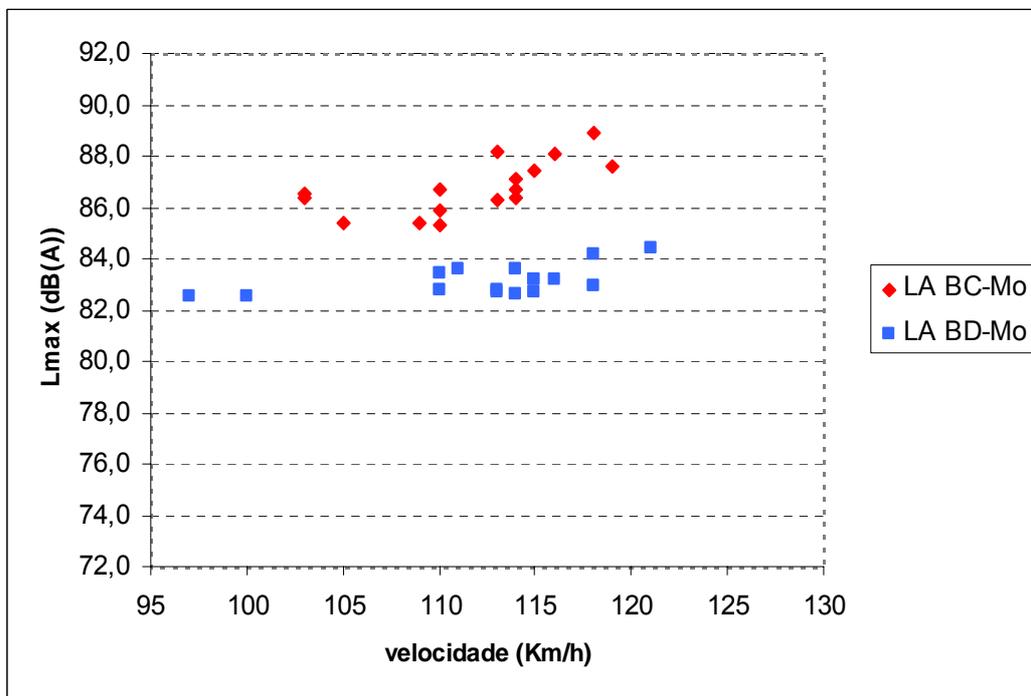


Figura VII. 8 – Níveis sonoros para os veículos ligeiros a velocidades altas, na condição molhado.



ANEXO VIII

Figura VIII.1 – Espectro de frequências para velocidades médias e altas, no pavimento betuminoso clássico na condição seco.

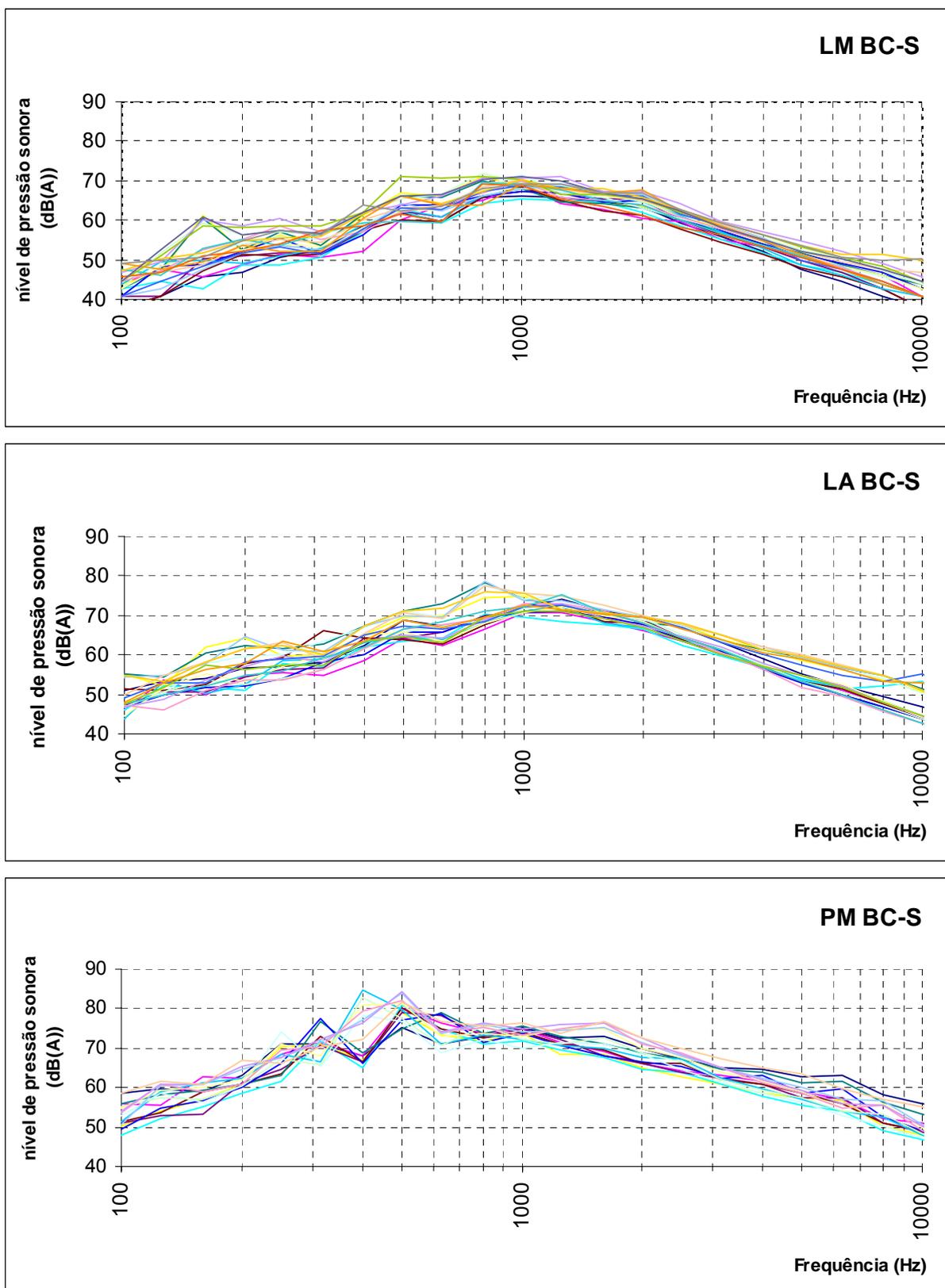


Figura VIII.2 – Espectro de frequências para velocidades médias e altas, no pavimento betuminoso drenante na condição seco.

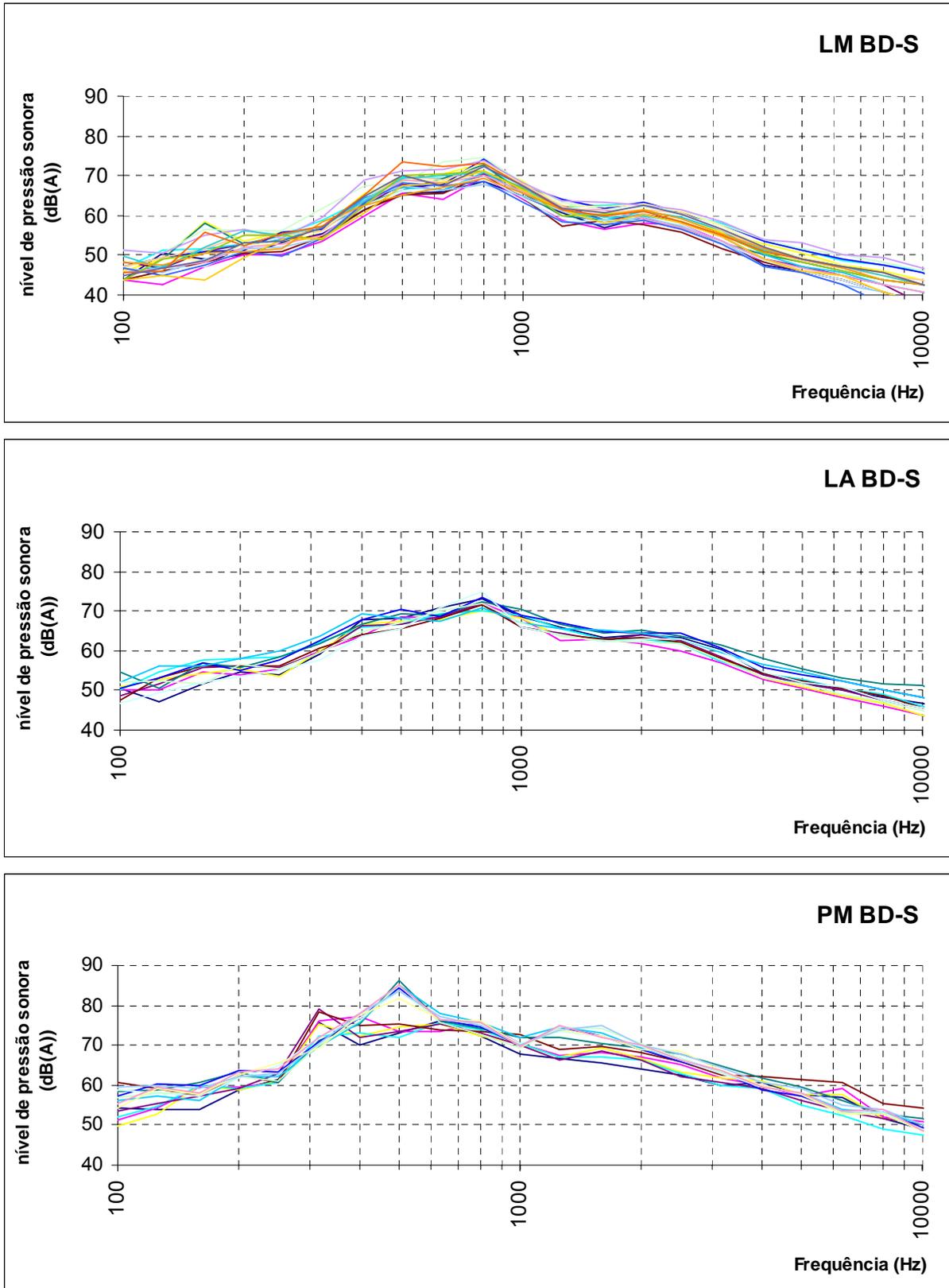


Figura VIII.3 – Espectro de frequências para velocidades médias e altas, no pavimento betuminoso clássico na condição molhado.

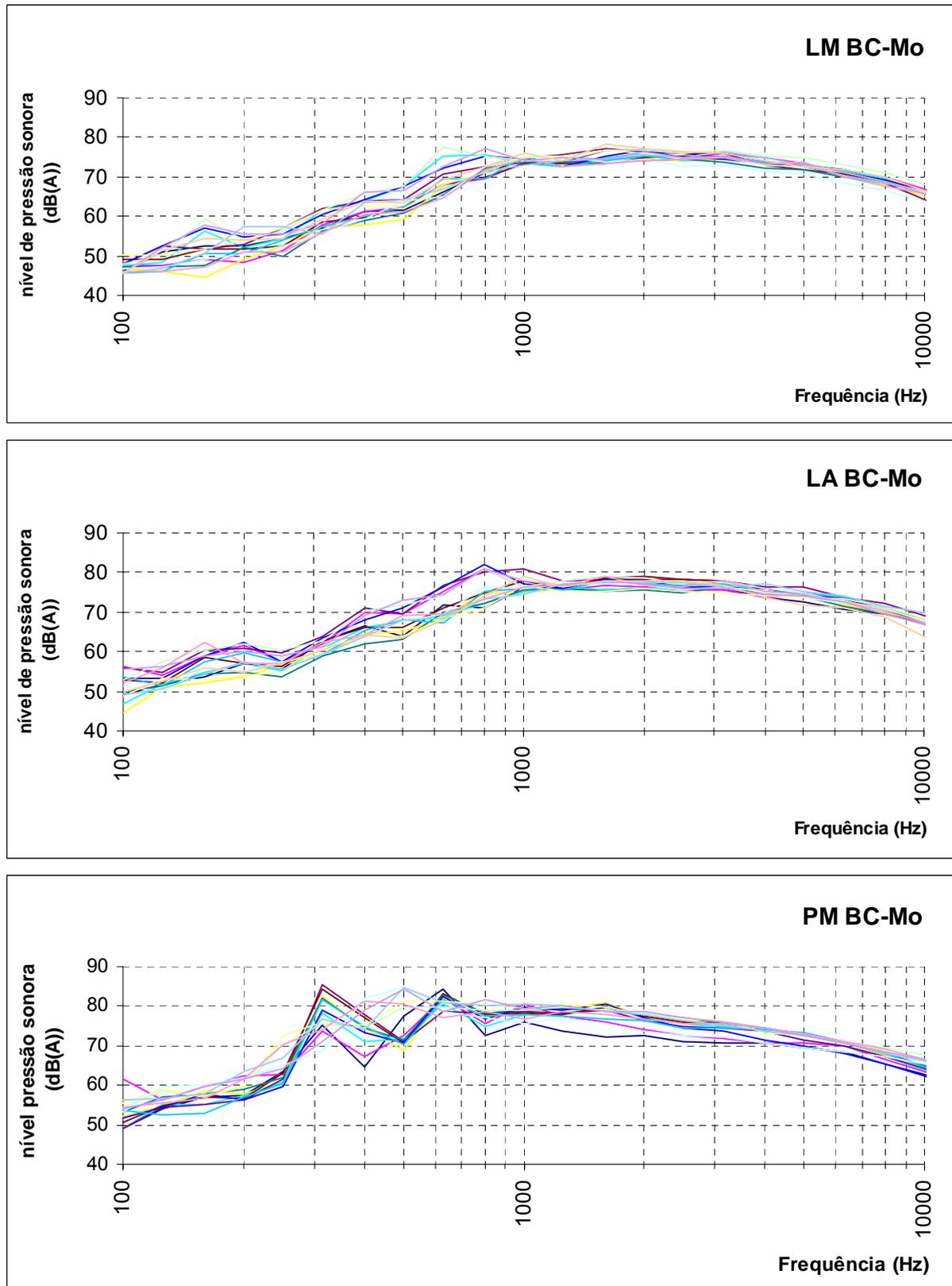


Figura VIII.4 – Espectro de frequências para velocidades médias e altas, no pavimento betuminoso drenante na condição molhado.

