



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

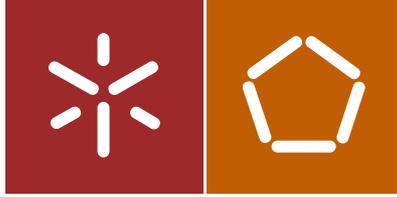
Ana Isabel Fernandes Oliveira

Avaliação do impacto das  
degradações no ruído pneu-pavimento

Ana Isabel Fernandes Oliveira  
Avaliação do impacto das  
degradações no ruído pneu-pavimento

UMinho | 2016

dezembro de 2016



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ana Isabel Fernandes Oliveira

Avaliação do impacto das  
degradações no ruído pneu-pavimento

Dissertação de Mestrado  
Ciclo de Estudos Integrados Conducentes ao  
Grau de Mestre em Engenharia Civil

Trabalho efetuado sob a orientação de  
Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas  
Professor Doutor Francisco Ferreira Martins

## **AGRADECIMENTOS**

Na realização da presente dissertação, contei com o apoio de múltiplas pessoas às quais estou profundamente grata. Assim demonstro o meu agradecimento:

À Professora Doutora Elisabete Fraga de Freitas pela orientação prestada, por todo o conhecimento transmitido, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou.

Ao Professor Doutor Francisco Ferreira Martins por todo o conhecimento transmitido, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou.

Ao João Lamas pelo conhecimento transmitido, pelo apoio, paciência e tempo despendido para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Engenheiro Carlos Palha, responsável do Laboratório de Vias de Comunicação da Universidade do Minho, e ao técnico de laboratório Hélder Torres pelo apoio, disponibilidade e colaboração nos ensaios de campo.

Ao Iran Gomes pelo apoio e incentivo transmitido e pela disponibilidade e colaboração nos ensaios de campo.

À família e amigos que estiveram sempre presentes pelo apoio, incentivo e força que sempre transmitiram e pela paciência e companheirismo prestado.



## RESUMO

Ao longo do tempo, a superfície dos pavimentos rodoviários desenvolve degradações devido às sucessivas passagens dos veículos e condições climáticas, provocando um incremento no ruído pneu-pavimento. Apesar de existir um certo número de estudos do ruído pneu-pavimento, nenhum deles aborda ou apresenta as degradações como fator influente. Neste contexto, esta dissertação analisa o ruído pneu-pavimento obtido em pavimentos com diferentes superfícies e tipos de degradações, com base em indicadores acústicos e psicoacústicos. Com esta informação, e recorrendo a técnicas de modelação avançadas, foi possível quantificar o impacto das degradações no ruído pneu-pavimento.

Para ser possível a modelação do ruído, teve-se em primeiro lugar que criar uma base de dados. Nesta foram considerados 11 trechos de pavimentos, com diferentes superfícies e degradações, tais como, pele de crocodilo, desagregação e fendilhamento, onde foram efetuadas as aquisições do ruído pneu-pavimento pelo método da proximidade imediata (CPX) a 3 níveis de velocidade (30, 50 e 65 km/h) e ensaios de macrotextura. Após o tratamento dos ficheiros de som, foram extraídos os indicadores Leq, LAeq, LAmáx, Loudness, Roughness, Sharpness CF e Sharpness MG, que constituem variáveis de saída. Fez-se uma abordagem inovadora à modelação do ruído pneu-pavimento com a utilização de técnicas *Data Mining*, sendo o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade as variáveis de entrada. Da combinação das variáveis de entrada e de saída resultaram 168 modelos devidamente validados pelo método da validação cruzada.

Comprovou-se assim que as degradações têm uma influência significativa no ruído pneu-pavimento, sendo mais significativa na pele de crocodilo e na desagregação. Verificou-se ainda que os diversos indicadores apresentam importâncias na ordem dos 30 a 40% para as patologias. No que diz respeito às velocidades superiores, as patologias apresentam importância na ordem dos 60%. Além disso, pode-se constatar que a técnica SVM é a que proporciona melhores modelos. Sendo assim, as patologias existentes na superfície do pavimento constituem um fator de redução da qualidade de vida das populações que deve ser tido em conta nos processos de avaliação da qualidade do ambiente junto das populações.

Palavras-chave: Ruído, pavimento, Método CPX, degradações, técnicas *data mining*



## ABSTRAT

Over time, with constant road traffic and climatic changes, the road pavement's surface undergoes degradations, causing not only discomfort to the drivers but also rolling noise. Although there are many studies of tire-to-pavement noise, none of them addresses or presents the degradations as an influent factor in noise. In this context, and based on acoustic and psychoacoustic indicators, this thesis analyses the noise caused by the tire-pavement interaction in pavements with different surfaces and types of degradations. With this information, and using advanced modelling techniques, it was possible to quantify the impact of the degradations on the noise generated by tire-pavement contact.

In order to model noise, it was first necessary to create a database. In this database, 11 pavement sections were considered, with different surfaces and degradations, such as crocodile skin, disintegration and splitting. The acquisition of the tire-pavement noise was carried out by the Close Proximity method (CPX) at 3 levels of speed (30, 50 and 65 km/h) and by using macrotexture tests. After the sound files were processed, the output variables Leq, LAeq, LAmax, Loudness, Roughness, Sharpness CF and Sharpness MG indicators were extracted. The input variables were therefore the type of pavement, pathologies, texture and speed. With this data, an innovative approach was applied to the modelling of tire-pavement noise with the use of Data Mining techniques. The combination of the input and output variables resulted in 168 models validated by the cross-validation method.

It has thus been shown that degradations have a significant influence on tire-pavement noise, with crocodile skin and disaggregation being the most influent. It was also verified that the various indicators present importances in the order of 30 to 40% for pathologies, considering all speeds and 30 km / h. With regard the superior velocities, 50 km / h and 65 km / h the pathologies present importances in the order of 60%. In addition, it can be seen that the SVM technique provides the best models. Therefore, the existing pathologies on the surface pavement are also a factor reducing the quality of life of the populations that must be taken into account in the processes of assessment of the quality of the environment among the populations.

Keywords: Noise, pavement, CPX method, degradations, data-minig techniques



## ÍNDICE GERAL

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	Enquadramento .....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Organização da dissertação .....	3
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>5</b>
2.1	Ruído rodoviário.....	5
2.2	Impactos na saúde .....	6
2.3	Ruído pneu-pavimento .....	8
2.4	Indicadores acústicos.....	11
2.5	Indicadores psicoacústicos .....	12
2.5.1	Loudness.....	13
2.5.2	Sharpness.....	15
2.5.3	Roughness.....	16
2.6	Técnicas de medição de ruído rodoviário.....	17
2.6.1	Método da proximidade imediata – CPX .....	17
2.6.2	Método estatístico de passagem – SBP .....	18
2.6.3	Método de passagem controlada – CPB .....	19
2.7	Fatores que influenciam o ruído .....	20
2.8	Degradações dos pavimentos rodoviários .....	22
2.9	Data mining.....	27
2.9.1	Técnicas de Data Mining.....	28
2.9.2	Avaliação das técnicas.....	30
2.9.3	Aplicações de técnicas data mining.....	31
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE ENSAIO .....</b>	<b>33</b>
3.1	Avaliação do ruído pneu-pavimento.....	33
3.1.1	Considerações Gerais .....	33
3.1.2	Aquisição do ruído pneu-pavimento.....	33
3.1.3	Trechos de estudo .....	34
3.1.4	Processamento e análise dos dados .....	37
3.2	Avaliação da textura da superfície do pavimento.....	40

3.2.1	Considerações gerais .....	40
3.2.2	Caraterização da textura com o perfilómetro a laser.....	40
3.2.3	Processamento e análise de dados.....	41
<b>3.3</b>	<b>Modelação do ruído pneu-pavimento.....</b>	<b>44</b>
3.3.1	Considerações gerais .....	44
3.3.2	Processamento e análise de dados.....	44
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1	Enquadramento metodológico .....	47
4.2	Avaliação da textura em função das degradações para os diferentes pavimentos .....	48
4.3	Influência do tipo de pavimento nos indicadores acústicos e psicoacústicos em função da velocidade.....	49
4.3.1	Nível de pressão sonora equivalente, em dB.....	49
4.3.2	Nível de pressão sonora, em dB(A) .....	51
4.3.3	Nível de pressão sonora máximo, em dB(A) .....	52
4.3.4	Loudness, em Sone.....	54
4.3.5	Roughness, em aspers .....	55
4.3.6	Sharpness CF, em acum .....	56
4.3.7	Sharpness MG, em acum.....	58
4.3.8	Avaliação geral.....	60
4.4	Avaliação do efeito das degradações nos indicadores acústicos em função da velocidade.....	60
4.4.1	Nível de pressão sonora equivalente, em dB.....	60
4.4.2	Nível de pressão sonora equivalente, em dB(A).....	63
4.4.3	Nível de pressão sonora máximo, em dB(A) .....	65
4.5	Avaliação do efeito das degradações nos indicadores psicoacústicos em função da velocidade.....	67
4.5.1	<i>Loudness, em Sone</i> .....	67
4.5.2	<i>Roughness, em aspers</i> .....	69
4.5.3	<i>Sharpness CF, em acum</i> .....	71
4.5.4	<i>Sharpness MG, em acum</i> .....	72
4.6	Avaliação do efeito das degradações em função da textura .....	74
4.6.1	Indicadores acústicos.....	74

4.6.2	Indicadores psicoacústicos .....	75
<b>4.7</b>	<b>Modelação do ruído pneu-pavimento .....</b>	<b>77</b>
4.7.1	Avaliação do desempenho das técnicas de DM.....	77
4.7.2	Avaliação das importâncias das variáveis de entrada em função das velocidades .....	81
4.7.2.1	1ª Análise – variáveis de entrada: tipo de pavimento, patologias, textura e velocidades.....	81
4.7.2.2	2ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a velocidade. ....	84
4.7.2.3	3ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a textura. ....	85
4.7.2.4	4ª Análise - variáveis de entrada: patologias, textura e velocidade .....	88
4.7.2.5	5ª Análise - variáveis de entrada: patologias e velocidade .....	90
4.7.3	Avaliação da importância das variáveis de entrada em função dos indicadores.....	91
4.7.3.1	1ª Análise – variáveis de entrada: tipo de pavimento, patologias, textura e velocidades.....	91
4.7.3.2	2ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a velocidade.....	93
4.7.3.3	3ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a textura. ....	95
4.7.3.4	4ª Análise - variáveis de entrada: patologias, textura e velocidade .....	96
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>99</b>
5.1	Conclusões gerais.....	99
5.2	Desenvolvimentos futuros .....	101
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>103</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO II.....</b>	<b>121</b>
	<b>ANEXO III.....</b>	<b>129</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Número de pessoas expostas a ruído de tráfego, em áreas urbanas com mais de 10000 hab., membros da <i>European Environment Agency</i> , em 2012, adaptado de (EEA, 2014) .....	5
Figura 2 – Gravidade dos efeitos do ruído na saúde e número de pessoas afetadas, adaptado de (EEA, 2014) .....	7
Figura 3 – Exemplos de mecanismos de geração mecânica da interação pneu-pavimento: Vibração radial causada pela interação bloco do piso-pavimento (a); Movimento aderência-deslize dos blocos no pavimento (b); Aderência entre os blocos e o pavimento na saída da zona de contacto (c) (Sandberg e Ejsmont, 2002) .....	9
Figura 4 – Exemplos de mecanismos de geração aerodinâmica da interação pneu-pavimento: Bombeamento do ar a sair e a entrar da zona de contacto (a e b); Amplificação sonora causada pelo órgão de tubos e a geometria de ressonador de Helmholtz dentro da trajetória de contacto (c); Ressonância acústica no espaço de ar no interior do pneu (d) (Sandberg e Ejsmont, 2002) .....	10
Figura 5 – Efeito da velocidade nas diversas fontes de ruído (Rasmussen <i>et al.</i> , 2007).....	10
Figura 6 – Posição dos microfones para medição do ruído utilizando o método CPX (Antunes <i>et al.</i> , 2011).....	18
Figura 7 – Configuração do ensaio pelo método estatístico de passagem (Antunes <i>et al.</i> , 2011).....	19
Figura 8 – Deformações no pavimento (EP – Estradas de Portugal, 2008) .....	24
Figura 9 – Diferentes tipos de fendilhamento (EP – Estradas de Portugal, 2008) .....	25
Figura 10 – Desagregação da camada de desgaste (EP – Estradas de Portugal, 2008).....	26
Figura 11 – Movimento dos materiais nos pavimentos (EP – Estradas de Portugal, 2008) 26	
Figura 12 – Etapas do processo KDD - Knowledge Discovery Database, (Thomé, 2008). 27	
Figura 13 – Princípios formais das técnicas : (a) Árvores de Regressão, (b) k-Vizinhos Próximos, (c) Redes Neurais Artificiais e (d) Máquinas de Vetores de Suporte (Martins <i>et al.</i> , 2010).....	30
Figura 14 – Método CPX montado no pneu de ensaio.....	34
Figura 15 – Pavimento MBB com pele de crocodilo .....	35
Figura 16 – Pavimento MBMB com fendilhamento .....	35
Figura 17 – Pavimento MBMB com desagregação.....	36
Figura 18 – Termómetro infravermelho de pistola.....	37

Figura 19 – Radar de velocidade do tipo pistola.....	37
Figura 20 – Representação gráfica do <i>loudness</i> (expresso em sone/bark) médio obtido pelo modelo <i>Loudness CF</i> .....	39
Figura 21 – Perfilómetro a laser, equipamento da Universidade do Minho .....	41
Figura 22 – Representação gráfica de MPD (expresso em mm) em função da distância (expresso em m) .....	42
Figura 23 – Profundidade média do perfil de diferentes pavimentos em função das degradações .....	48
Figura 24 – Leq do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	50
Figura 25 – Leq do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	50
Figura 26 – Leq do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	50
Figura 27 – LAeq do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	51
Figura 28 – LAeq do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	51
Figura 29 – LAeq do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	52
Figura 30 – LAm <sub>ax</sub> do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	53
Figura 31 – LAm <sub>ax</sub> do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	53
Figura 32 – LAm <sub>ax</sub> do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	53
Figura 33 – <i>Loudness</i> do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	54
Figura 34 – <i>Loudness</i> do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	54
Figura 35 – <i>Loudness</i> do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	55
Figura 36 – <i>Roughness</i> do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	55

Figura 37 – <i>Roughness</i> do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade .....	56
Figura 38 – <i>Roughness</i> do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade .....	56
Figura 39 – <i>Sharpness CF</i> do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade .....	57
Figura 40 – <i>Sharpness CF</i> do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	57
Figura 41 – <i>Sharpness CF</i> do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	58
Figura 42 – <i>Sharpness MG</i> do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade .....	59
Figura 43 – <i>Sharpness MG</i> do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	59
Figura 44 – <i>Sharpness MG</i> do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade.....	59
Figura 45 – Nível de pressão sonora (dB) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo.....	61
Figura 46 – Nível de pressão sonora (dB(A)) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	63
Figura 47 – Nível de pressão máximo (dB(A)) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	65
Figura 48 – <i>Loudness</i> (Sones) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	68
Figura 49 – <i>Roughness</i> (aspers) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	70
Figura 50 – <i>Sharpness CF</i> (acum) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	71
Figura 51 – <i>Sharpness MG</i> (acum) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	72
Figura 52 – Indicadores acústicos em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	74
Figura 53 – <i>Loudness</i> em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	75

Figura 54 – Sharpness em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	76
Figura 55 – Roughness em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo .....	77
Figura 56 – Exemplo da técnica (SVM) através de pontos de dispersão (LAm <sub>max</sub> estimado vs LAm <sub>max</sub> calculado) .....	81
Figura 57 – Importâncias relativa das variáveis, numa 1 <sup>a</sup> análise, em função das velocidades, para: a) LA <sub>eq</sub> ; b) LA <sub>max</sub> ; c) Leq; d) <i>Loudness</i> ; e) <i>Roughness</i> ; f) <i>Sharpness MG</i> .....	82
Figura 58 – Importâncias relativa às variáveis, numa 2 <sup>a</sup> análise, em função das velocidades, para: a) LA <sub>eq</sub> ; b) LA <sub>max</sub> ; c) Leq; d) <i>Loudness</i> ; e) <i>Roughness</i> ; f) <i>Sharpness MG</i> .....	85
Figura 59 – Importâncias relativa às variáveis, numa 3 <sup>a</sup> análise, em função das velocidades, para: a) LA <sub>eq</sub> ; b) LA <sub>max</sub> ; c) Leq; d) <i>Loudness</i> ; e) <i>Roughness</i> ; f) <i>Sharpness MG</i> .....	86
Figura 60 – Importâncias relativa às variáveis, numa 4 <sup>a</sup> análise, em função das velocidades, para: a) LA <sub>eq</sub> ; b) LA <sub>max</sub> ; c) Leq; d) <i>Loudness</i> ; e) <i>Roughness</i> ; f) <i>Sharpness MG</i> .....	89
Figura 61 – Importâncias relativa às variáveis, numa 5 <sup>a</sup> análise, para: a) LA <sub>eq</sub> ; b) LA <sub>max</sub> ; c) Leq; d) <i>Loudness</i> ; e) <i>Roughness</i> ; f) <i>Sharpness MG</i> .....	90
Figura 62 – Importância da variável tipo de pavimento, em função dos indicadores para a 1 <sup>a</sup> análise.....	92
Figura 63 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 1 <sup>a</sup> análise .....	92
Figura 64 – Importância da variável textura, em função dos indicadores para a 1 <sup>a</sup> análise	92
Figura 65 – Importância da variável velocidade, em função dos indicadores para a 1 <sup>a</sup> análise .....	93
Figura 66 – Importância da variável velocidade, em função dos indicadores para a 2 <sup>a</sup> análise .....	94
Figura 67 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 2 <sup>a</sup> análise .....	94
Figura 68 – Importância da variável tipo de pavimento, em função dos indicadores para a 2 <sup>a</sup> análise.....	94
Figura 69 – Importância da variável textura, em função dos indicadores para a 3 <sup>a</sup> análise	95
Figura 70 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 3 <sup>a</sup> análise .....	96
Figura 71 – Importância da variável tipo de pavimento, em função dos indicadores para a 3 <sup>a</sup> análise.....	96

Figura 72 – Importância da variável textura, em função dos indicadores para a 4ª análise 97

Figura 73 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 4ª análise  
..... 97

Figura 74 – Importância da variável velocidade, em função dos indicadores para a 4ª análise  
..... 98



**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1 – Designações para o cálculo do <i>loudness</i> e do nível de <i>loudness</i> .....	14
Tabela 2 – Pavimentos escolhidos e respetivas degradações. ....	35
Tabela 3 – Valores de MPD (expresso em mm) para cada trecho de estudo .....	43
Tabela 4 – Identificação das variáveis de entrada e de saída para cada combinação.....	45
Tabela 5 – Medidas baseadas no erro e coeficiente de correlação para a 1ª análise considerando todas as velocidades para o indicador L <sub>Amax</sub> .....	78
Tabela 6 – Medidas baseadas no erro e coeficiente de correlação para a 1ª análise considerando todas as velocidades para indicador <i>Roughness</i> .....	79
Tabela 7 – Importâncias relativas à 1ª análise considerando todas as velocidades para indicador <i>Roughness</i> .....	79
Tabela 8 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 6 análises com todas as velocidades como base de dados .....	79
Tabela 9 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 4 análises com as velocidades de 30 km/h como a base de dados .....	80
Tabela 10 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 4 análises com as velocidades de 50 km/h como a base de dados .....	80
Tabela 11 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 4 análises com as velocidades de 65 km/h como a base de dados .....	80



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento

Com a evolução populacional, e posterior multiplicação de indústrias, estabelecimentos comerciais, atividades de lazer ruidosas e com o tráfego rodoviário, a poluição sonora tem-se tornado um dos maiores problemas de todo mundo, essencialmente em meios urbanos. Sendo assim, o ruído tornou-se um dos principais fatores de degradação da qualidade de vida, onde a população se encontra exposta a níveis de ruído superiores aos limitados pela *World Health Organisation* (WHO). Todo o som indesejado, que provoca incomodidade ou até mesmo problemas na saúde, é considerado um ruído.

Na maioria das cidades, o tráfego rodoviário é a maior causa de ruído, e normalmente, os níveis de ruído aumentam com volumes de tráfego e velocidades mais elevadas (WHO, 2011). A exposição ao ruído ambiente é responsável por um conjunto de efeitos sobre a saúde, incluído o aumento do risco de doenças no coração, assim como distúrbios no sono, disfunção cognitiva nas crianças, aborrecimento e risco para a saúde mental, relacionados com o stress e o zumbido (WHO, 2011).

Para controlar os problemas relacionados com o ruído ambiental existem vários estudos. Sendo o ruído de tráfego uma das componentes principais para o ruído ambiental, este tem sido base para muitas dessas análises, onde um dos principais objetivos é a redução de ruído, tanto a nível de emissão como de propagação.

Atualmente com a redução do ruído do motor, o ruído do pneu tornou-se uma das principais fontes de ruído dos automóveis (Mak e Hung, 2014). O ruído pneu/pavimento é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelo comportamento dos condutores, pelas características dos pneus, pelas características da superfície do pavimento e pelo clima (Freitas *et al.*, 2012d).

Na generalidade, os estudos existentes para a caracterização do ruído de tráfego e sua redução relacionam a velocidade, a composição do tráfego e a superfície do pavimento com o ruído. A velocidade do veículo tem uma forte influência na incomodidade em todos os tipos de pavimentos, assim como a composição do tráfego, onde maiores densidades correspondem a taxas de incomodidade mais elevadas (Freitas *et al.*, 2012a).

No entanto, com as sucessivas passagens de veículos e as variações climáticas, após um certo período de tempo, os pavimentos rodoviários passam a apresentar diversos tipos de degradações ou patologias, como por exemplo, fendas ou pele de crocodilo.

Apesar das características da superfície serem consideradas um dos fatores influentes no ruído pneu/pavimento, não existem estudos que relacionem as patologias existentes na superfície com o ruído pneu/pavimento. As patologias existentes na superfície do pavimento para além de causarem desconforto aos condutores, aparentam influenciar o ruído do tráfego rodoviário devido ao aumento das vibrações do pneu, provocando um aumento do incómodo.

Para demonstrar o que atualmente é a perceção dos utentes das estradas, torna-se imprescindível um estudo acústico detalhado de pavimentos degradados. Para tal, existem três fatores-chave associados que devem ser considerados neste tipo de estudos: tipo de pavimento, velocidade do tráfego e nível de degradação do pavimento. Neste contexto, nesta dissertação procurar-se-á desenvolver um modelo de previsão do ruído pneu/pavimento tendo em conta, a velocidade do tráfego, o tipo de pavimento e ainda, as patologias existentes na superfície do pavimento. Para tal prevê-se a utilização de técnicas *data mining* (DM), visto que estas apresentam elevado sucesso na previsão de ruído pneu/pavimento (Freitas *et al.*, 2015) e permitem ainda avaliar o impacto das variáveis consideradas no modelo na previsão feita.

## **1.2 Objetivos**

O principal objetivo do trabalho é a avaliação do impacto das degradações, que se desenvolvem ao longo do tempo na superfície dos pavimentos, no ruído provocado pelo contacto pneu/pavimento. Esta avaliação será baseada numa análise prévia dos dados recolhidos e na modelação do ruído pneu-pavimento, que permitirá o estabelecimento de modelos de previsão do ruído pneu/pavimento e subsequente cálculo do parâmetro

importância de cada uma das variáveis do modelo. Assim, para atingir este objetivo é fundamental atingir também os seguintes objetivos secundários:

- Atualização do estado do conhecimento no âmbito do ruído pneu-pavimento e aplicação de técnicas DM no âmbito do ruído;
- Definição do conjunto de patologias a estudar;
- Estabelecimento de relações entre os indicadores acústicos e psicoacústicos e cada um dos fatores considerados: velocidade de circulação, tipo de pavimento e patologia;
- Desenvolvimento de um modelo de previsão do ruído para cada um dos indicadores de ruído;
- Análise do impacto das patologias da superfície do pavimento selecionadas no ruído pneu/pavimento.

### **1.3 Organização da dissertação**

De forma a enquadrar os diferentes assuntos e fases do trabalho, esta dissertação encontra-se dividida em sete capítulos. Neste primeiro capítulo correspondente à introdução, enquadra-se o tema da dissertação, os objetivos da realização deste trabalho e faz-se uma descrição do mesmo.

Os capítulos dois, três e quatro fazem parte do estado do conhecimento, isto é, apresentam informações e estudos relevantes no âmbito do tema. No capítulo dois são abordados e discutidos vários conceitos relacionados com o ruído, bem como as técnicas de medição do mesmo e os fatores que o influenciam. No capítulo três são abordados conceitos relacionados com os pavimentos e as degradações que estes apresentam. No capítulo quatro apresentam-se as técnicas DM, bem como a forma de avaliação das mesmas.

O capítulo cinco descreve as metodologias, procedimentos e materiais adotados no decorrer do trabalho, para a avaliação do ruído pneu-pavimento, avaliação da textura da superfície do pavimento e modelação do ruído pneu-pavimento.

No sexto capítulo é apresentada a análise dos resultados obtidos para o método da proximidade imediata (CPX) e para a modelação do ruído pneu-pavimento.

Finalmente, no sétimo capítulo é apresentada uma síntese do trabalho efetuado, salientando se as conclusões mais relevantes. Nesta parte são também sugeridos desenvolvimentos futuros que possam dar continuidade ao estudo desenvolvido no âmbito da presente dissertação.

## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Ruído rodoviário

O ruído é um problema ambiental que afeta um grande número de pessoas, interferindo na qualidade de vida da população (Figura 1). A componente mais influente do ruído ambiental é o ruído de tráfego rodoviário, contudo a sociedade necessita que os padrões mínimos de ruído sejam mantidos para que possam exercer as suas atividades, pois a sua ausência causaria problemas para a circulação dos peões e dos ciclistas.

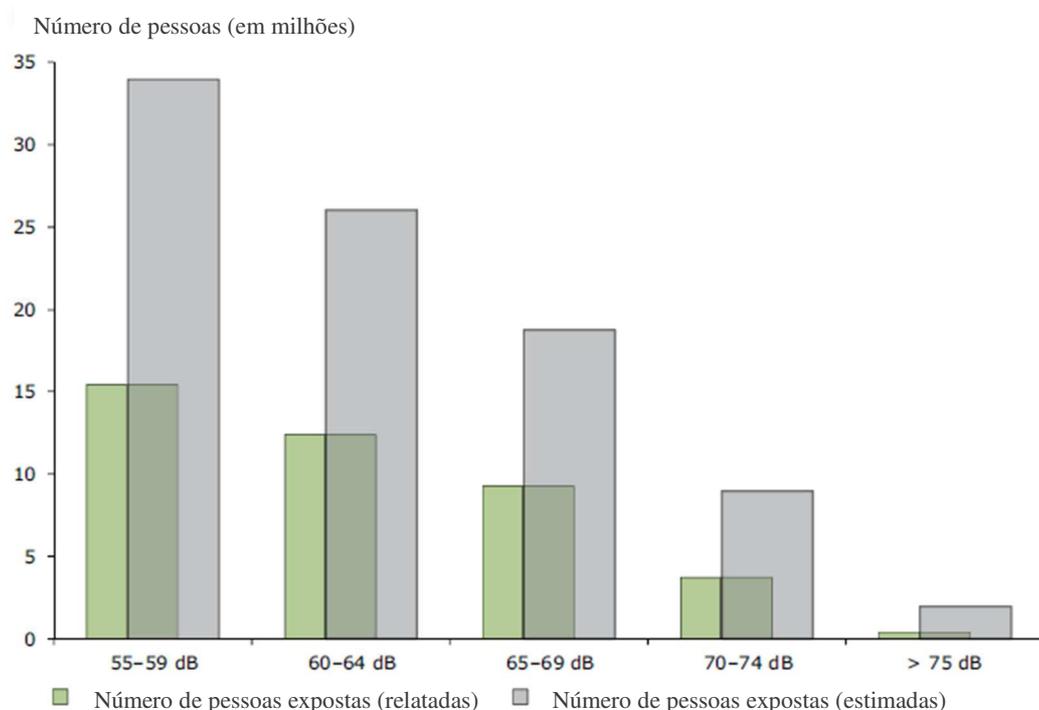


Figura 1 – Número de pessoas expostas a ruído de tráfego, em áreas urbanas com mais de 10000 hab., membros da *European Environment Agency*, em 2012, adaptado de (EEA, 2014)

O ruído produzido pelo veículo pode ser classificado em três categorias: o ruído do motor, o ruído aerodinâmico e o ruído pneu-pavimento. A baixas velocidades, inferiores a 40 km/h, o ruído do motor predomina sobre o ruído produzido pelo veículo, enquanto a velocidades elevadas sobressai o ruído produzido pelo contacto pneu-pavimento (Hanson *et al.*, 2004).

Assim o ruído rodoviário resulta essencialmente dos mecanismos de contacto entre o pneu e a superfície do pavimento (Freitas, 2008). Atualmente com a redução do ruído do motor, aumentou a importância do ruído do pneu, sendo que é uma das principais fontes de ruído dos automóveis (Mak e Hung, 2014).

De forma a minorar os impactos do ruído na sociedade são realizados estudos que visam reduzir o ruído do tráfego, envolvendo aspetos relacionados com a sua geração, como os pavimentos e os veículos, mas também com a propagação de ruído. Sendo assim puderam ser tomadas medidas que permitem reduzir o ruído, como a aplicação de um motor mais sossegado ou aplicação de um pavimento de baixo ruído, mas também medidas que visam reduzir o ruído na sua propagação, como aplicação de barreiras.

## **2.2 Impactos na saúde**

Segundo a União Europeia (EEA, 2014), é considerado ruído todo o som exterior indesejado ou prejudicial criado por atividades humanas, incluído o ruído rodoviário, ferroviário, aeroportos e zonas industriais.

O ruído ambiental é um importante problema da sociedade, pois engloba uma elevada percentagem da população, essencialmente em zonas urbanas, criando uma ameaça para a saúde pública. Sendo que, a elevados níveis de poluição sonora associados a zonas urbanas, a tendência de exposição ao ruído tem vindo a aumentar. Atualmente são efetuados estudos que visam, a tomada de medidas para prevenir o ruído e controlar a poluição sonora, para salvaguardar a saúde humana e o bem-estar das populações. No entanto, a noção de tolerância e reação ao ruído do indivíduo pode dificultar a execução desses estudos, pois a incomodidade provocada pelo ruído pode variar conforme o indivíduo, podendo depender da sua idade, das experiências individuais, do seu estado de espírito, entre outros fatores, assim como a circunstância em que este ocorre (IA, 2004).

A exposição ao ruído ambiente é responsável por um conjunto de efeitos sobre a saúde, como o aumento do risco de doenças no coração, assim como distúrbios no sono, disfunção cognitiva nas crianças, aborrecimento e risco para a saúde mental, relacionados com o stress e o zumbido (WHO, 2011).

O ruído pode causar problemas a nível físico, psicológico e fisiológico da população (Figura 2). A nível físico, existem essencialmente perdas auditivas, que poderão ser temporárias ou permanentes, dependendo da intensidade e do período de exposição ao ruído. A nível psicológico existem variações no comportamento da população exposta, sendo associadas a efeitos como o stress, a fadiga, diminuição da concentração e a irritabilidade. A nível fisiológico existem alterações nas atividades do corpo humano, havendo por exemplo, alterações no ritmo cardíaco e respiratório, da pressão sanguínea ou das tensões musculares (IA, 2004).



Figura 2 – Gravidade dos efeitos do ruído na saúde e número de pessoas afetadas, adaptado de (EEA, 2014)

Uma das principais fontes do ruído ambiental é o tráfego rodoviário, onde se estima que 125 milhões de pessoas são afetadas por níveis de ruído superiores a 55dB. Segundo *European Environment Agency* (EEA):

- O ruído ambiente provoca, pelo menos, 10000 casos de morte prematura, em cada ano, na Europa;
- Aproximadamente, 20 milhões de adultos sofrem de incómodo e mais de 8 milhões sofrem perturbações no sono provocado por ruído;
- Mais de 90000 casos de hipertensão são causados pelo ruído ambiental;

Segundo a Organização Mundial de saúde (WHO) a poluição sonora é o segundo problema mais importante, ficando atrás da poluição do ar. Sendo o ruído um dos principais problemas de saúde a nível Europeu, a União Europeia, no 7th EAP (Seventh Environment Action Programme) tem como objetivo reduzir, até 2020, a poluição sonora para níveis aceitáveis pela Organização Mundial de Saúde (EEA, 2014).

### **2.3 Ruído pneu-pavimento**

O ruído ambiental apresenta como principal fonte o ruído de tráfego, sendo este, a velocidades superiores a cerca de 40 km/h predominado pelo ruído provocado pelo contacto pneu-pavimento. Tendo em conta que o ruído do motor dos veículos é cada vez mais reduzido, os estudos que visam a redução do ruído de tráfego têm-se baseado na sua componente referente ao contacto entre o pneu e o pavimento.

O ruído gerado pelo contacto pneu-pavimento é influenciado, de forma geral, por vários fatores, tais como: o modelo e idade do veículo, o peso do eixo a pressão do pneu, o tipo, tamanho, textura e material do pneu, superfície da estrada, precipitação e temperatura, assim como velocidade do veículo (Santos, 2007). Sendo assim, o ruído provocado pelo contacto pneu-pavimento é um fenómeno bastante complexo, visto que existem muitos mecanismos de emissão que contribuem para o seu valor global.

Os mecanismos de geração de ruído pneu-pavimento podem ser divididos, segundo a sua origem, em mecânicos e aerodinâmicos. Os mecanismos de geração mecânica são divididos em vibrações tangenciais e radiais do pneu, vibrações do tipo stick-slip e stick-snap (Figura 3). As vibrações tangenciais e radiais são ativadas por forças tangenciais de contacto e pela rugosidade da superfície que provocam deformações no pneu. As vibrações do tipo stick-slip e stick-snap, resultam do fenómeno de aderência-desliza e aderência-deslocamento, respetivamente. As vibrações stick-slip estão associadas a situações em que forças tangenciais elevadas são aplicadas aos pneus. Estas desenvolvem-se quando existe um aumento da velocidade e o atrito é reduzido, provocando, alternadamente aderência e deslizamento do pneu à superfície da estrada. As vibrações stick-snap ocorrem quando há adesão entre o pavimento e a superfície do pneu, gerando vibrações tangenciais ou radiais (Santos, 2007).

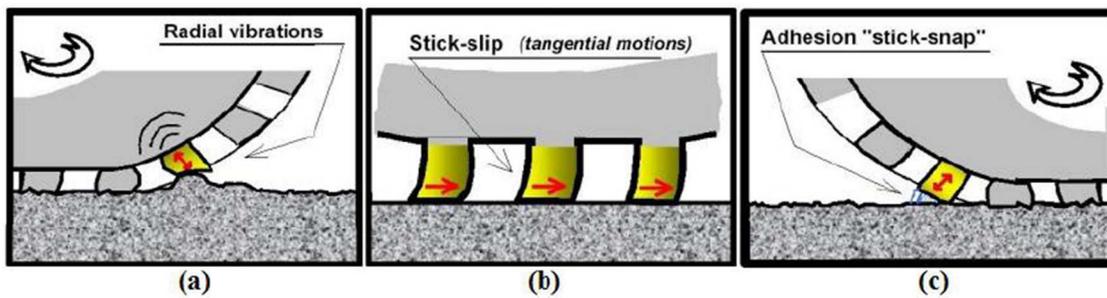


Figura 3 – Exemplos de mecanismos de geração mecânica da interação pneu-pavimento: Vibração radial causada pela interação bloco do piso-pavimento (a); Movimento aderência-deslize dos blocos no pavimento (b); Aderência entre os blocos e o pavimento na saída da zona de contacto (c) (Sandberg e Ejsmont, 2002)

Os mecanismos de geração aerodinâmica são divididos em bombeamento do ar (*air pumping*), ressonância da cavidade no tubo do pneu, radiação da ressonância do ar e ressonância tubular (Figura 4). O efeito de bombeamento de ar é gerado quando o pneu interage com a superfície da estrada provocando compressão e expansão do ar. As ressonâncias na cavidade interna do conjunto roda-pneu contribuem para o ruído gerado pelos pneus, estas ressonâncias são visíveis em descontinuidades mas não para um pneu em circulação livre. A ressonância de Helmholtz poderá ocorrer na extremidade traseira do pneu, esta caracteriza-se pela movimentação do ar entre as cavidades interconectadas da banda de rodagem e a superfície do pavimento, amplificado por ressonâncias (Callai, 2011). Cada perfil de piso, em contacto com uma superfície de estrada lisa, constitui um sistema de ressoadores tubulares. As suas frequências de ressonância dependem das propriedades geométricas, mas não da velocidade de rotação do veículo (Santos, 2007).

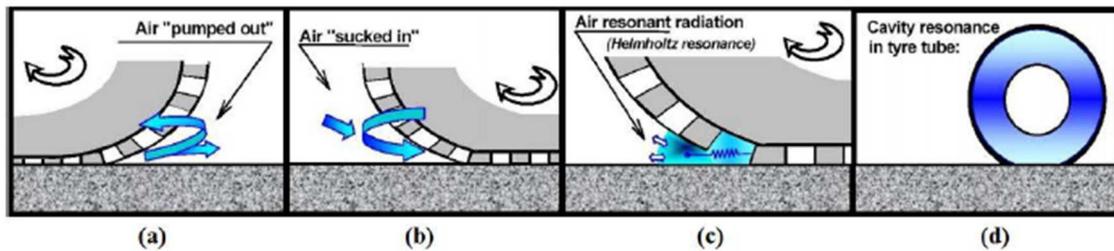


Figura 4 – Exemplos de mecanismos de geração aerodinâmica da interação pneu-pavimento: Bombeamento do ar a sair e a entrar da zona de contacto (a e b); Amplificação sonora causada pelo órgão de tubos e a geometria de ressonador de Helmholtz dentro da trajetória de contacto (c); Ressonância acústica no espaço de ar no interior do pneu (d) (Sandberg e Ejsmont, 2002)

O ruído de tráfego é todo o som resultante dos veículos em movimento, sendo geralmente associado a um conjunto de fontes, sendo essas divididas, geralmente em, ruído de propulsão, ruído pneu-pavimento e ruído aerodinâmico (Figura 5).

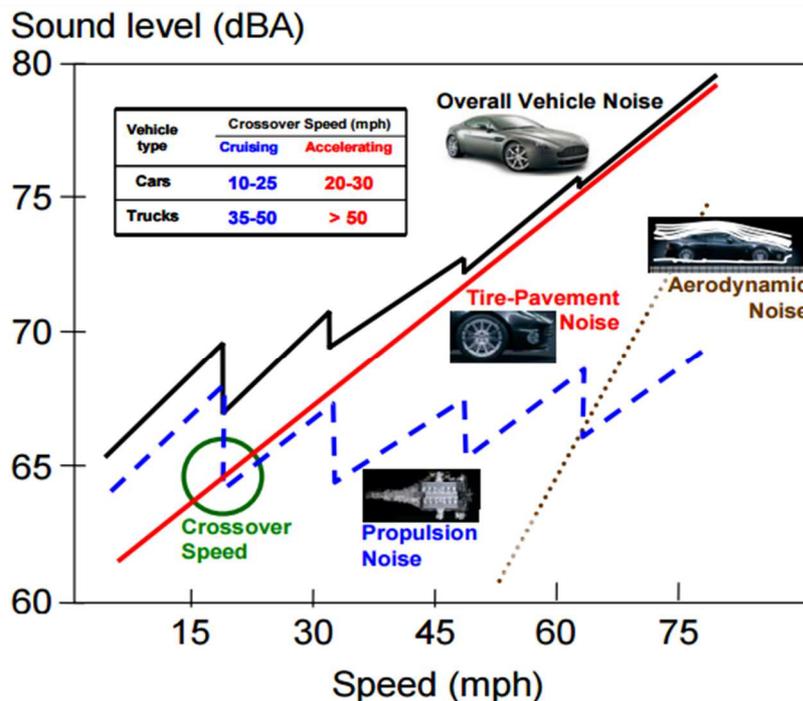


Figura 5 – Efeito da velocidade nas diversas fontes de ruído (Rasmussen *et al.*, 2007)

O ruído de propulsão inclui o ruído gerado pelo motor, escape, admissão, entre outros componentes fornecedores de energia do veículo. O ruído pneu-pavimento é gerado pelo

contacto entre a superfície do pavimento e o pneu, o ruído aerodinâmico está relacionado com a turbulência do veículo. A baixas velocidades o ruído de propulsão irá dominar o ruído total do veículo, conforme a velocidade vai aumentando o ruído pneu-pavimento vai dominar o ruído total do veículo, mas quando as velocidades são muito elevadas o ruído proveniente das fontes aerodinâmicas é preponderante (Rasmussen *et al.*, 2007).

## 2.4 Indicadores acústicos

Um ruído varia ao longo do tempo, revelando quebras e picos ao longo do sinal. Assim um ruído com uma elevada intensidade poderá durar apenas uma fração de segundo e não provocar incómodo, enquanto um ruído de baixa intensidade, como o tráfego, é produzido num longo período de tempo, ou seja é contínuo, provocando um maior incómodo (Santos, 2007). Sendo assim, para uma eficaz descrição do som e seu período de tempo são geralmente utilizados determinados indicadores, que caracterizam o ambiente acústico exterior, como por exemplo o nível de ruído máximo ( $L_{max}$ ) e mínimo ( $L_{min}$ ) e o nível sonoro contínuo equivalente ( $L_{eq}$ ).

Segundo o Decreto-Lei n.º 9 de 17 de Janeiro de 2007, um indicador de ruído é o parâmetro físico-matemático para a descrição do ruído ambiente que tenha uma relação com um efeito prejudicial na saúde ou no bem-estar humano (Ministério do ambiente, 2007).

O  $L_{eq}$  é o indicador admitido e utilizado internacionalmente como o mais representativo do ruído observado num determinado local e durante um certo intervalo de tempo, denominado por nível sonoro contínuo equivalente que é sempre reportado a um intervalo de tempo (IA, 2004). Importa salientar que o valor de  $L_{eq}$  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  $L_{min}$  e  $L_{max}$  representam o nível de pressão sonora mínimo e máximo, respetivamente, registado no intervalo de tempo de medição.

O nível sonoro contínuo equivalente e os níveis de pressão sonora mínimo e máximo podem ser expressos 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.

O  $L_{xx}$  representa os indicadores estatísticos ou níveis percentis, isto é, níveis de pressão sonora que foram excedidos durante uma certa percentagem de tempo durante as medições. Os mais usuais são o L10 e o L95 e outro, embora menos utilizado, o L50. O L10 corresponde ao nível de pressão sonora que foi excedido durante 10% do tempo de edição, sendo um bom indicador da ocorrência dos níveis de pressão sonora mais elevados. O L50 corresponde ao nível de pressão sonora que foi excedido durante 50% do tempo de medição, é um parâmetro de grande utilidade prática, mas é normalmente escolhido um indicador mais seguro ( $L_{Aeq}$ ). O L95 corresponde ao nível de pressão sonora que foi excedido durante 95% do tempo de medição, sendo assim é um bom indicador do “ruído de fundo” existente num determinado local (IA, 2004).

Incluídos nos indicadores de ruído podem ainda definir-se os níveis sonoros contínuos equivalentes por períodos do dia, sendo o período diurno compreendido entre as 7 e as 20 horas, o período do entardecer compreendido entre as 20 e as 23 horas e o período noturno compreendido entre as 23 e as 7 horas. Assim, o indicador de ruído diurno ( $L_d$ ) ou ( $L_{dia}$ ) corresponde a uma série de períodos diurnos representativos de um ano, o indicador de ruído do entardecer ( $L_e$ ) ou ( $L_{entardecer}$ ) corresponde a uma série de períodos do entardecer representativos de um ano e o indicador de ruído noturno ( $L_n$ ) ou ( $L_{noite}$ ) correspondente a uma série de períodos noturnos representativos de um ano. Existe ainda o indicador de ruído ambiente composto  $L_{den}$ , que corresponde ao período do dia total, expresso em dB(A) (Ministério do ambiente, 2007).

A avaliação do ruído geralmente é efetuada em termos do indicador  $L_{eq}$ , podendo no entanto ser conveniente a sua utilização em conjunto com outros indicadores.

## 2.5 Indicadores psicoacústicos

O ruído, quando reconhecido pelo ouvido humano, causa reações. Estas para além de dependerem de certas características, também dependem do indivíduo e condições físicas e psicológicas deste. Fisicamente, o ruído é um estímulo complexo feito de várias vibrações mecânicas ou flutuações de pressão que são disseminados em meios elásticos.

Percetivelmente, quando as vibrações atingem o ouvido humano, dentro das frequências audíveis, irão causar excitação do nervo e, assim, produzir a representação mental do som. A representação auditiva de um som depende de parâmetros físicos específicos, ou seja, frequência, período e amplitude (Mendonça, 2012).

Na descrição do ruído ambiente é importante a avaliação acústica dos indicadores de ruído ponderados pelo filtro A,  $L_{Aeq}$  e  $L_{Amax}$ . Para uma melhor previsão e comparação de diferentes pavimentos, torna-se importante complementar essa avaliação com indicadores psicoacústicos, tais como, o *loudness*, *roughness* e *sharpness*. Sendo assim torna-se possível com a modelação e combinação destes indicadores levar a um som objetivo e independente do individuo em questão (Raggam *et al.*, 2007).

Vários parâmetros psicoacústicos, tais como o *loudness*, *sharpness*, *roughness*, etc., têm sido propostos para relacionar, quantitativamente, estímulos sonoros de sensações humanas (Wang *et al.*, 2013).

### 2.5.1 *Loudness*

*Loudness*, ou intensidade auditiva, é um termo psicológico usado para descrever a magnitude de uma sensação auditiva, sendo potencialmente dependente do número total de impulsos nervosos que chegam ao cérebro por segundo, ao longo do aparelho auditivo. Esses fenómenos auditivos dependem, não só da intensidade do som, mas também da sua composição física, ou seja, o tipo de ouvido que recebe o som, e as condições fisiológicas e psicológicas do ouvinte (Fletcher e Munson, 1933).

O *loudness* depende, principalmente, da pressão sonora assim como da frequência e da forma de onda do estímulo. A medição do *loudness* é uma parte significativa no estudo da sonoridade, pois a intensidade de um som ou ruído desempenha um papel importante na reprodução do som (Olson, 1972), tornando-se esta uma característica dominante para qualquer avaliação da qualidade do som.

O nível de *loudness* é dado pela Equação (1), e a relação entre *loudness* (em sonos) e o nível de *loudness* (em phons) é dada pela Equação (2) (Olson, 1972):

$$P = 20 \log_{10} \frac{p}{p_0} \quad (1)$$

Onde:

$P$  é a pressão sonora medida, em microbares;

$p$  é o nível de Loudness, em phons;

$p_0$  é a pressão sonora de 0.0002 microbares.

$$S = 2^{(P-40)/10} \quad (2)$$

Onde:

$S$  é o *loudness*, em sones;

$P$  é o nível de pressão sonora, em phons, dado pela equação 1.

Para estímulos sonoros de banda larga, cuja intensidade se mantém sensivelmente constante no tempo, a sensação de intensidade auditiva pode determinar-se a partir da análise espectral dos níveis de pressão sonora em bandas de oitava ou de terços de oitava. O modo de realizar esta combinação está descrito na norma ISO 532 (1975), existindo dois métodos distintos, sendo método A estabelecido por Stevens em 1961, e método B estabelecido por Zwicker em 1979, consoante a distribuição espectral em causa e o tipo de campo sonoro (Antunes, 2011).

Tabela 1 – Designações para o cálculo do *loudness* e do nível de *loudness*

Método	Quantidade medida		Largura de banda de análise	Campo sonoro
	<i>Loudness</i>	Nível de <i>loudness</i>		
A	sones	phons	oitava	difuso
B	sones	phons	1/3 oitava	difuso
	sones	phons		livre

O método de Stevens é adequado apenas para sons sem componentes tonais, enquanto que o método de Zwicker tem uma aplicação mais ampla, tendo sido adaptado recentemente.

PsySound3 é um software para análise de ficheiros de som que utiliza algoritmos físicos e psicoacústicos. Este, atualmente, implementa dois principais modelos de *loudness*, o de Chalupper e Fastl e o de Moore, Glasberg e Baer (Cabrera *et al.*, 2008).

Existem muitos modelos para prever a sensação subjetiva do Loudness. Nas últimas décadas, os modelos de loudness utilizados em psicoacústica podem ser divididos entre os que utilizam filtros auditivos Bark (ou bandas críticas) e Erb, bem como entre modelos estáveis e dinâmicos (Cunha, 2013). As escalas Bark e Erb são semelhantes em conceito, exceto que os filtros auditivos Erb têm largura de banda mais estreita do que os filtros Bark e a distribuição do filtro difere particularmente na faixa de frequência abaixo de 500 Hz.

Para obter os valores de *loudness* segundo o modelo de Chalupper e Fastl utilizou-se um método standard (*Zwicker's Model* de soma de loudness – ISO 532-B) que é apresentado como uma metodologia gráfica para a análise da área sob a curva do *loudness*, expressa em Sones/Bark, em que Bark é a unidade de frequência da chamada escala da taxa de banda crítica.

### 2.5.2 *Sharpness*

*Sharpness*, ou agudeza, é uma sensação auditiva relacionada com a frequência, e é uma medida psicoacústica usada algumas vezes para avaliar a qualidade do som (Mendonça, 2012). Os parâmetros mais importantes que influenciam o *sharpness* são o conteúdo espectral e a frequência central de sons de banda estreita e correspondente largura de banda (Zwicker e Fastl, 2013). Componentes de frequência mais elevadas, geralmente resultam em medições de *sharpness* mais elevadas (Mendonça, 2012).

A sua unidade de medida é o acum (palavra com origem do latim acumem, que tem como significado agudo), que corresponde ao estímulo produzido por um ruído de banda estreita, com a largura de banda igual à banda crítica centrada na frequência de 1000 Hz, e com um nível de 60 dB. No entanto, dada a dependência do atributo *sharpness* com o nível de estímulo sonoro, foi proposta por Aures uma correção à expressão de Zwicker, traduzida pela expressão (Antunes, 2011):

$$S = 0.11 \frac{\int_0^{24} N'(z)g(z) dz}{\ln(0.05N + 1)} \quad acum \quad (3)$$

Onde:

$$g(z) = \begin{cases} 1 & \text{para } z \leq 15.8 \\ 0.15 \times e^{0.42 \times (z-15.8)} & \text{para } z > 15.8 \end{cases} \quad (4)$$

### 2.5.3 Roughness

O *Roughness*, ou rugosidade, é um indicador psicoacústico relacionado com a dissonância sensorial. É a sensação de batimentos produzidos pela interação de dois ou mais componentes que são detetados dentro de uma determinada distância no ouvido interno. Esta distância é conhecida como largura de banda crítica, e varia com a frequência (Mendonça, 2012).

A unidade do *roughness* é o asper (palavra latina quem significa áspero), e equivale a um som de 1000 Hz com 100% de modulação em amplitude e com uma frequência de modulação de 70 Hz.

Um dos modelos mais utilizados para a caracterização deste atributo foi desenvolvido por Aures em 1985, exprimindo-se matematicamente pela relação (Antunes, 2011):

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_0^{24} \Delta L'(z)z dz \quad (5)$$

Em que  $\Delta L'(z) = 20 \log_{10}(N_{max}/N_{min})$ , em que N é a sensação de audição específica. Zwicker redefiniu esta equação de modo a incluir a frequência de modulação, a qual passou a ser (Antunes, 2011):

$$R = 0.3f_{mod} \int_0^{24} \Delta L'(z)z dz \quad (6)$$

Modelos de rugosidade para estímulos simples são dados por Zwicker e Fastl. Um modelo de rugosidade aplicável a estímulos arbitrários foi desenvolvido por Aures e otimizado por

Daniel & Weber, sendo este o modelo que é implementado em PsySound3, usando o código fornecido por Dik Hermes (Cabrera *et al.*, 2007).

## 2.6 Técnicas de medição de ruído rodoviário

A realização de estudos de ruído tem por base a avaliação do ruído de tráfego sob duas vertentes, a ambiental e a do pneu-pavimento. A nível da vertente ambiental, o Decreto-Lei n.º 9/2007 de 17 de Janeiro da República Portuguesa estabelece e articula o novo Regulamento Geral de Ruído (RGR) com outras normas e/ou regimes jurídicos portugueses. No que diz respeito à vertente pneu-pavimento esta pode ser avaliada segundo vários métodos, sendo os mais utilizados:

- Método da proximidade imediata (Close-Proximity Method – CPX);
- Método estatístico de passagem (Statistical Pass-by Method – SPB);
- Método de passagem controlada (Controlled Pass-by Method – CPB).

### 2.6.1 Método da proximidade imediata – CPX

Relativamente ao método da proximidade imediata (CPX) a sua execução é simples, pois é realizado em contínuo, integrando-se na corrente de tráfego, sendo possível medir o nível de pressão sonora gerado pelo contato pneu-pavimento. Este método consiste na medição do ruído junto a uma roda do veículo (Figura 6), podendo ser realizado de duas formas, com o auxílio de um atrelado normalizado, sendo neste caso utilizado dois microfones que são colocados junto à roda de ensaio, ou simplesmente, quando os microfones são colocados junto à roda do próprio veículo. Como os microfones são colocados junto ao pneu os ruídos gravados são apenas os provenientes das interações pneu-pavimento.

Este método é recomendado na norma ISO 11819-2: 2000: “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close – Proximity Method”. Apesar de neste método haver a influência do ruído aerodinâmico e do ruído de rodoviário do tráfego normal da via e o facto do pneu de ensaio não ser representativo do tráfego normal da via trata-se de um método bastante vantajoso. No que diz respeito à gestão da qualidade da rede rodoviária, pois é caracterizada a exata influência do pavimento no ruído pneu-pavimento, o número de medições é reduzido e não é necessário condicionar o tráfego normal da via (Santos, 2007).

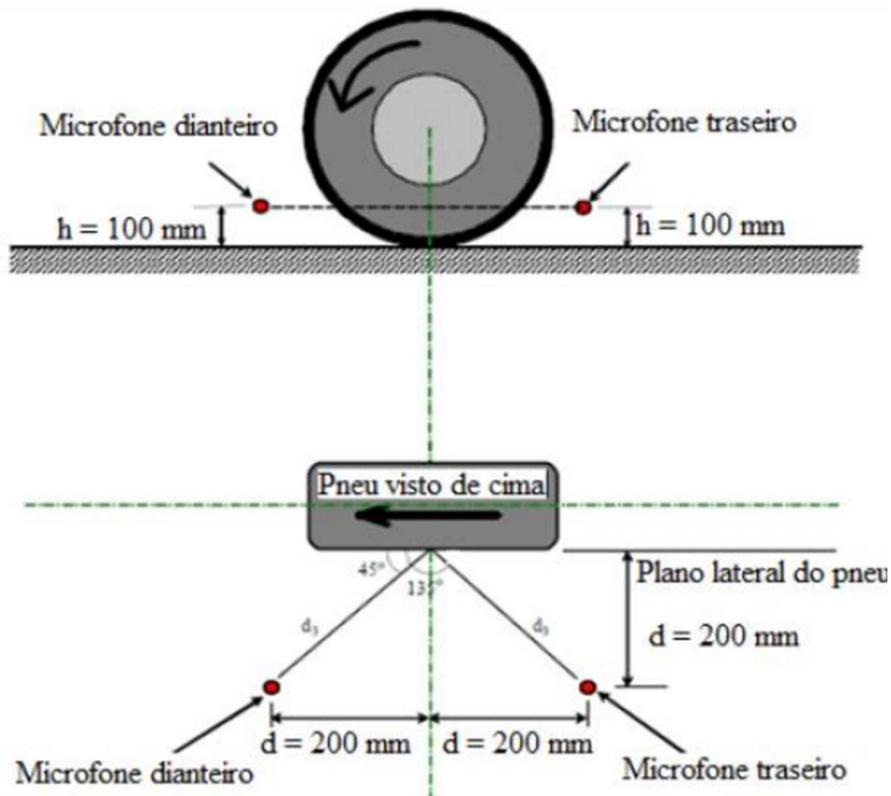


Figura 6 – Posição dos microfones para medição do ruído utilizando o método CPX  
(Antunes *et al.*, 2011)

### 2.6.2 Método estatístico de passagem – SBP

No que diz respeito ao método estatístico de passagem (SBP), este baseia-se na medição dos níveis máximos de pressão sonora, ponderada A, de um significativo número de veículos. Este método é executado com a colocação de microfones a 7,5 m da via e a 1,2 m acima da superfície do pavimento (Figura 7), onde é registado o nível sonoro e a velocidade dos veículos de diferentes classes, sendo estes, os veículos que compõem o tráfego em condições normais de circulação. A amostra é caracterizada por um vasto número de veículos, sendo pelo menos 100 veículos ligeiro, 30 pesados com dois eixos e 30 pesados com mais de dois eixos. Os níveis sonoros recolhidos das medições permitem caracterizar o pavimento rodoviário através do Índice Estatístico de Passagem (Statistical Pass-By Index – SPBI), permitindo a comparação das camadas superficiais de pavimentos rodoviários, de forma que a sua influência no nível de ruído de um fluxo de tráfego misto possa ser determinado. Um dos problemas da aplicação deste método é a variabilidade do tráfego, sendo que muitas das vezes se compara diretamente os níveis de ruído a diferentes níveis de velocidade obtidos em pavimentos diferentes e considerando uma única categoria de veículos (Freitas *et al.*,

2012c). As principais desvantagens deste método é a sua limitação do espaço caracterizado, não podendo ter superfícies refletoras, e sua aplicabilidade em estradas de elevado volume de tráfego.

Este método está descrito na norma ISO 11819-1:1997: “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: Statistical Pass-By Methods”.

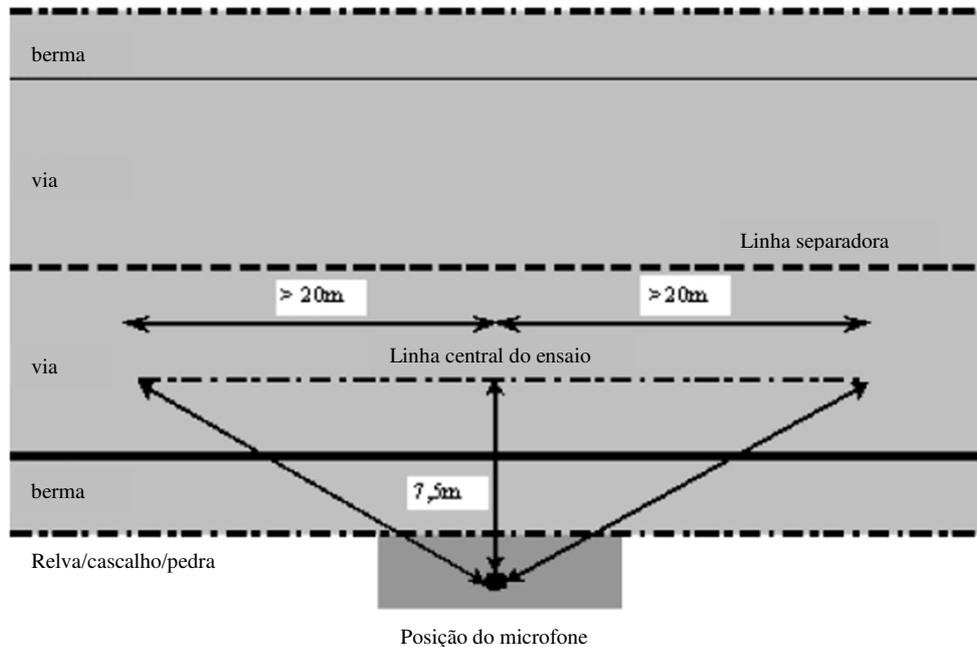


Figura 7 – Configuração do ensaio pelo método estatístico de passagem (Antunes *et al.*, 2011)

### 2.6.3 Método de passagem controlada – CPB

O método da passagem controlada (CPB) é semelhante ao método SPB. Este apenas difere na seleção dos veículos. Neste método os veículos, em vez de serem os que circulam normalmente na corrente de tráfego, são um ou vários veículos selecionados, sendo controladas as restantes condições, como a velocidade, o tipo de pneu, a mudança engrenada no veículo e o número de passagens.

Neste método, como os veículos utilizados são selecionados, o número de medições necessárias é menor e a incerteza na determinação da eficácia do pavimento é menor. No

entanto, este tipo de ensaio exige o condicionamento do tráfego normal da via e os veículos selecionados poderão não ser representativos do tráfego normal da via (MacDade *et al.*, 2012, Santos, 2007).

## **2.7 Fatores que influenciam o ruído**

O ruído de tráfego é influenciado, de uma forma geral, pela densidade e velocidade de tráfego e pelo tipo de pavimento. Como o ruído pneu/pavimento é uma das principais fontes do ruído de tráfego, este torna-se afetado por vários fatores, nomeadamente pelo comportamento dos condutores, pelas características dos pneus, pelas características da superfície do pavimento e pelo clima (Freitas *et al.*, 2012d).

O ruído pneu-pavimento é afetado pelo comportamento do condutor, visto que este determina a forma de condução, ou seja, a velocidade de circulação, a aceleração e desaceleração, sendo que um mesmo veículo, apesar de se encontrar num mesmo ambiente e superfície poderá gerar distintos ruídos visto que a capacidade de resposta de cada condutor é desigual.

As características dos pneus que influenciam o ruído de contacto pneu-pavimento são a carga e a pressão de ar e a geometria do pneu, definida por: diâmetro exterior e diâmetro da jante, largura e altura, desenho da escultura do piso ou da banda de rolamento (Freitas *et al.*, 2008). Estas características, apesar de serem um dos componentes que influenciam o ruído de tráfego, atualmente a sua componente tem vindo a reduzir, visto que as empresas tentam otimizar as suas características tanto a nível de segurança e conforto, como redução do ruído.

Existe uma variedade de características da superfície do pavimento que interferem no ruído pneu-pavimento, não apenas a nível de emissão, mas também, de propagação, sendo algumas mais influentes, tais como, a textura superficial, a porosidade, a espessura do pavimento, a adesão pneu-pavimento e a rigidez do revestimento (Cabral *et al.*, 2014).

A textura da superfície é um fator de grande influência na geração de ruído, esta é dividida em três escalas, macrotextura, microtextura e megatextura. A macrotextura depende da proximidade dos agregados, estando relacionada com o tamanho destes e com os espaços vazios existentes na superfície do revestimento, influenciando a drenagem do pavimento e o

ruído pneu-pavimento. A microtextura é a rugosidade da superfície individual dos agregados do revestimento, influenciando diretamente o atrito. A megatextura está relacionada com degradações em fase acentuada, ondulações e desníveis no pavimento, sendo assim para além de influenciar o ruído pneu-pavimento, condiciona a comodidade e a estabilidade da condução. Sendo assim, podemos afirmar que a microtextura têm um pequeno efeito no ruído em comparação com a macrotextura, sendo que, para a redução do ruído a otimização da macrotextura desempenha um fator essencial.

Um pavimento, após a sua construção, está sujeito a variações climáticas e ação do tráfego que contribuem para a degradação do mesmo, alterando as suas características iniciais. As degradações são responsáveis por alterações da textura e da rugosidade do pavimento provocando assim alterações no ruído resultante do contacto pneu-pavimento.

A porosidade da camada superficial dos pavimentos é um fator determinante no ruído pneu-pavimento, particularmente na sua propagação. Por exemplo, um pavimento poroso, com índice de vazios superiores a 15% tem uma maior capacidade de absorção do som comparado com pavimentos normais, com cerca de 4% de vazios. A porosidade permite uma melhor absorção sonora, visto que permite não só a drenagem da água do pavimento mas também do ar que preenche as ranhuras do pneu, resultando na redução da reflexão acústica do pavimento e na atenuação da propagação das ondas na superfície deste (Freitas, 2008).

A rigidez, embora de forma mais reduzida, também contribui na geração do ruído. Na medida em que, quanto mais elástico for o material do revestimento maior será a sua capacidade de atenuar o nível de pressão sonora, pois este será capaz de absorver mais impactos (Cabral *et al.*, 2014).

O clima é um dos fatores que influênciam o ruído não só na sua geração, mas também na propagação do mesmo. As condições climáticas que mais influenciam o ruído são o vento na sua direção e velocidade e a temperatura ambiente. O vento e a temperatura alteram a trajetória do som. No que diz respeito à temperatura, esta poderá ser avaliada tanto a nível do pavimento, como do ar, e caso esta aumente, irá verificar-se uma redução no ruído (Costa, 2014).

Além do vento e temperatura, em termos de condições climatéricas, a chuva também é um fator a ter em conta, visto que em pavimentos densos com presença de água existe um aumento de ruído, essencialmente a velocidades reduzidas. No que diz respeito a pavimentos porosos, a presença de água desempenha um papel mais reduzido no ruído pneu-pavimento (Rasmussen *et al.*, 2007).

## **2.8 Degradações dos pavimentos rodoviários**

Os pavimentos rodoviários são divididos, fundamentalmente, em flexíveis, rígidos e semi-rígidos. Os flexíveis, que constituem maioritariamente a rede rodoviária portuguesa, apresentam uma constituição básica de um conjunto de camadas superiores compostas por misturas betuminosas, e um conjunto de camadas inferiores formadas por materiais granulares assentes numa camada de fundação (Silva, 2006). Os pavimentos semi-rígidos são constituídos por camadas superiores compostas por misturas betuminosas, e um conjunto de camadas inferiores formadas por materiais granulares tratados com ligantes hidráulicos, com uma importante influência na capacidade de carga do pavimento, assentes numa camada de fundação. Os pavimentos rígidos diferem dos restantes pavimentos, pois na sua composição básica, apresentam uma camada de desgaste constituída por um betão de elevada resistência.

A constituição do pavimento, números de camadas e tipo de materiais utilizados, dependerá das solicitações às quais o pavimento será submetido durante o seu período de vida. Nos pavimentos, as camadas betuminosas tem vindo a aumentar a sua espessura, de forma a aguentar a intensidade de tráfego a que este é solicitado.

Fundamentalmente, os pavimentos dividem as suas funções em estruturais e funcionais. A nível funcional, de forma a criar uma superfície regular e resistente, com suficiente rugosidade e resistência ao desgaste, de modo a garantir segurança e comodidade de circulação. A nível estrutural de modo a reduzir as tensões verticais aplicadas ao nível da fundação, para que esta resista às solicitações de tráfego, impedindo ainda o acesso de água externa às camadas granulares e ao solo de fundação (Silva, 2006).

Ao longo do seu período de vida, o pavimento está sujeito a solicitações que provocam a sua degradação. Estas acontecem, essencialmente, devido às solicitações de tráfego e dos agentes climáticos.

O ruído pneu-pavimento é afetado por vários fatores, sendo essencialmente influenciado pelas características da superfície da estrada. Quando esta desenvolve diferentes tipos de degradações espera-se que irá influenciar o ruído de tráfego de alguma forma.

Com as diversas solicitações do pavimento e com as condições climáticas, a que este está sujeito no seu período de vida, existe alterações da superfície do mesmo, desenvolvendo-se diversos tipos de degradações.

As degradações funcionam como uma cadeia de acontecimentos, em que cada uma dará origem a novos tipos de degradações e assim sucessivamente, aumentando a percentagem de patologias existentes, tanto em extensão como em potencial evolutivo (Maia, 2013).

Os vários tipos de degradações podem ser agrupados em quatro famílias: deformações, fendilhamento, desagregação da camada de desgaste e movimento de materiais (Maia, 2013). Dentro da família das deformações (Figura 8) existem: deformações localizadas, ondulação, rodeiras e abatimento. As deformações localizadas são depressões que resultam da rotura do pavimento numa pequena área do mesmo, causadas por acumulação de água, devido ao défice de elementos de drenagem e falta de capacidade do solo de fundação. As ondulações são uma deformação que se repete com determinada frequência ao longo do pavimento, ocorrendo nas camadas de desgaste constituídas por revestimentos superficiais ou betão betuminoso pouco espesso devido a vários fatores, como por exemplo, deficiências construtivas. As rodeiras são deformações transversais que se desenvolvem longitudinalmente na banda de ação dos rodados dos veículos pesados, estas podem se dividir em rodeiras de pequeno ou grande raio. As rodeiras de pequeno raio acontecem devido a problemas nas misturas betuminosas, enquanto que as rodeiras de grande raio acontecem, principalmente, devido à falta de capacidade de carga do solo de fundação (Maia, 2013). Outra deformação no pavimento que poderá surgir é o abatimento do mesmo, podendo ser longitudinal ou transversalmente.

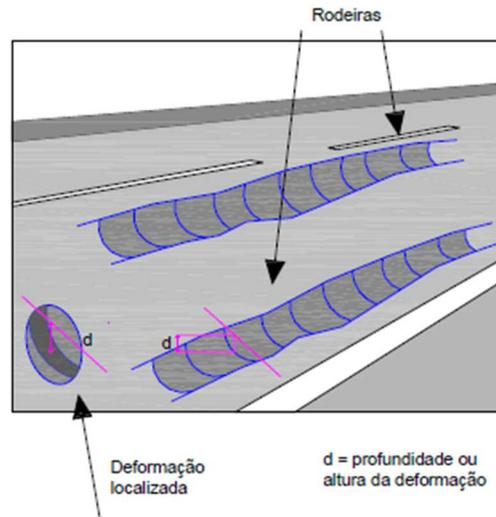


Figura 8 – Deformações no pavimento (EP – Estradas de Portugal, 2008)

Dentro da família do fendilhamento poderá existir fendas isoladas ou pele de crocodilo. O fendilhamento apresenta diferentes tipos de desenvolvimento, podendo ser dividido em, fendas isoladas, transversais ou longitudinais à via, fendas parabólicas e pele de crocodilo (Figura 9). O fendilhamento por fadiga, associado, frequentemente, aos estados limite de ruína de um pavimento é causada pela fadiga nos pavimentos rodoviários, ou seja, pela passagem repetida de veículos. As fendas são aberturas na camada de desgaste, classificadas como fissuras quando a abertura é perceptível a olho nu a uma distância inferior a 1,5 m. Este tipo de degradação contribui para o enfraquecimento das camadas granulares e do solo de fundação do pavimento com a possível penetração de água pelas fendas (Maia, 2013). As fendas longitudinais caracterizam-se pela direção predominantemente paralela ao eixo da via onde se insere, enquanto as fendas parabólicas ou ramificadas se manifestam na zona de passagem de tráfego, com o eixo da parábola orientado no sentido longitudinal, estas apresentam uma regularidade geométrica com blocos de vários tamanhos. Relativamente à pele de crocodilo esta caracteriza-se, de forma geral, por uma mala ou grelha superficial, este trata-se de fendilhamento excessivo à superfície do pavimento, associado ao limite de ruína do mesmo (Maia, 2013).

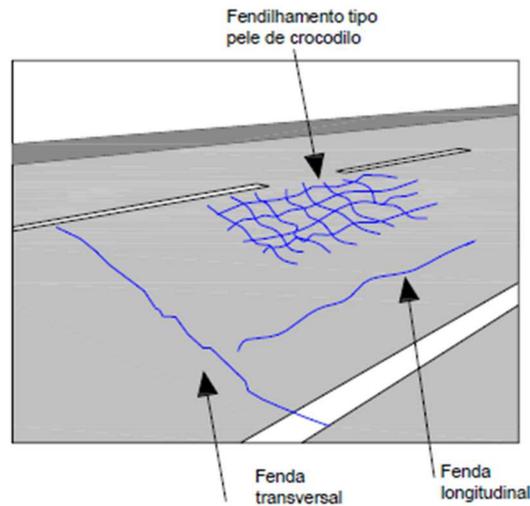


Figura 9 – Diferentes tipos de fendilhamento (EP – Estradas de Portugal, 2008)

Na família desagregação da camada de desgaste esta poderá ser repartida em desagregação superficial, cabeça de gato, pelada e ninhos (Figura 10). A desagregação superficial resulta do desgaste rápido do ligante betuminoso que envolve os agregados de granulometria mais grossa, originando o desprendimento destes, assim como a perda de qualidade dos materiais que a compõem a camada de desgaste. A cabeça de gato resulta da perda de micro-textura superficial dos agregados, ou seja, o desgaste da componente mais fina da mistura betuminosa, provocando a redução do coeficiente de atrito entre os pneus e o pavimento, com evidentes consequências na segurança de circulação dos veículos. As peladas decorrem de um desprendimento de pequenas placas da camada de desgaste em relação à sua camada inferior, camada de regularização, estas podem ter a sua origem na deficiente ligação entre as duas camadas betuminosa, na sua espessura reduzida ou ainda em problemas de estabilidade da camada de desgaste. Relativamente aos ninhos ou covas esta apresenta-se como depressões de forma arredondada localiza na camada de desgaste, podendo prosseguir para camadas inferiores, à semelhança da desagregação superficial (EP – Estradas de Portugal, 2008).

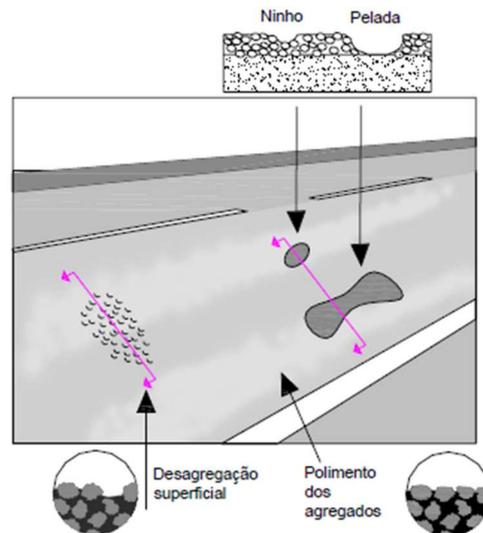


Figura 10 – Desagregação da camada de desgaste (EP – Estradas de Portugal, 2008)

Na família de movimento de materiais inclui-se a exsudação e subida de finos (Figura 11). A exsudação consiste na subida do ligante para a superfície devido à má formulação da camada de desgaste, que em consonância com a ação severa do tráfego e das altas temperaturas, leva à migração daquela para a superfície do pavimento. A subida de finos que ocorre sobretudo quando o pavimento já se encontra fendilhado e quando em conjunto existe nas proximidades um nível freático elevado, devido a certas ações climáticas. Com a passagem de tráfego pesado é exercida uma força de compressão sobre o pavimento provocando a saída da água do interior das camadas, facultando a saídas das partículas finas para o exterior (Freitas, 2012).

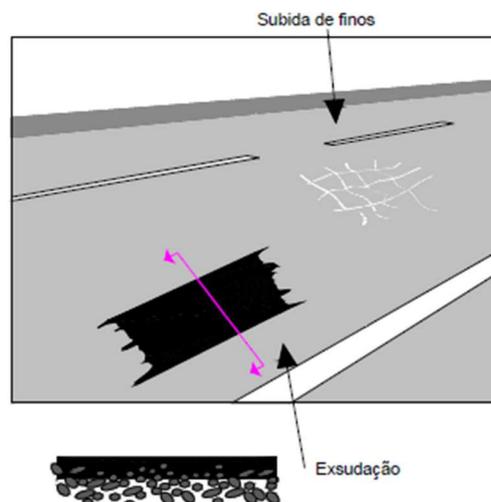


Figura 11 – Movimento dos materiais nos pavimentos (EP – Estradas de Portugal, 2008)

## 2.9 Data mining

Os modelos de previsão do ruído são uma ferramenta que pode ser aplicada durante a conceção e formulação da superfície do pavimento da estrada, podendo indicar o desempenho da superfície do pavimento segundo as suas características (Freitas *et al.*, 2015). Sendo assim, tais modelos são bastante úteis. O recurso a técnicas *Data Mining* (DT) para o estabelecimento deste tipo de modelos pode ser uma vantagem dada a complexidade da modelação do ruído.

Nas últimas décadas, os progressos alcançados nos sistemas computacionais têm permitido o desenvolvimento de novas ferramentas que possibilitam a criação e o armazenamento de dados. O processo de transformação desses dados em conhecimento é designado por Knowledge Discovery in Database (KDD- Descobrimto de conhecimento a partir de dados). No entanto, o termo KDD refere-se a um processo geral de descoberta de conhecimento, sendo a técnica de *data mining* uma das principais etapas nesse processo. Assim sendo, o DM consiste na aplicação de métodos e técnicas em grandes quantidades de dados, de forma a encontrar padrões consistentes e/ou relacionamentos sistemáticos entre variáveis, possibilitando assim, prever tendências e comportamentos futuros, permitindo aos gestores a tomada de decisões baseada em factos e não em suposições (Martins *et al.*, 2008).

O processo KDD pode ser resumido em cinco etapas principais (Figura 12): seleção de dados, pré-processamento, transformação, modelação e interpretação (Freitas *et al.*, 2015, Thomé, 2008).

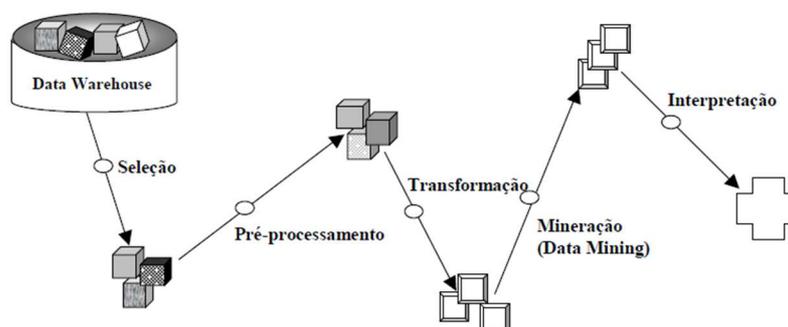


Figura 12 – Etapas do processo KDD - Knowledge Discovery Database, (Thomé, 2008)

A seleção de dados é a etapa que consiste no agrupamento de dados, de forma organizada, e na seleção dos dados necessários para o processo de busca de padrões e na geração de conhecimento.

O pré-processamento de dados permite a melhoria da qualidade de dados, melhorando, conseqüentemente, os processos subsequentes. Trata-se de uma etapa de elevada importância, pois as bases de dados são, geralmente, muito grandes e contém registos que comprometem a qualidade dos dados, como por exemplo, falta de informação, registos duplicados, assimetria, entre outros. Esta etapa de pré-processamento pode subdividir-se em limpeza de dados, integração de dados, transformação de dados e redução de dados (Schmitt, 2005).

A transformação dos dados é a etapa em que os dados pré-processados são modificados em um formato correto, e posteriormente armazenados, visando facilitar o uso dos algoritmos das técnicas DM. Nesta etapa, geralmente, são aplicadas técnicas de redução de dimensionalidade e de projeção de dados.

Na modelação existe a aplicação de algoritmos e técnicas computacionais específicas, como o processo DM, que permitem a procura de padrões nos dados após a sua transformação e extrair modelos de dados com relações complexas e que proporcionam bons resultados (Freitas *et al.*, 2012b). No processo de DM são usadas ferramentas de análise estatísticas, assim como técnicas da área da inteligência artificial, ou técnicas baseadas em regras e outras técnicas inteligentes.

Por fim existe a interpretação dos dados que consiste na análise dos resultados da modelação e na geração de conhecimento pela interpretação dos dados permitindo a tomada de decisões válidas e benéficas.

### **2.9.1 Técnicas de *Data Mining***

Na etapa de modelação poderão ser utilizadas distintas técnicas DM, sendo algumas delas: Árvores de Regressão (*Regression Tree – RT*), Regressões Múltiplas (*Multiple Regressions – MR*), Redes Neurais Artificiais (*Neural Networks – NN*), Máquinas de Vetores de Suporte

(*Support Vector Machine - SVM*) e k-Vizinhos Próximos (*k-Nearest Neighbor - KNN*). A seguir é apresentada uma descrição sucinta destas técnicas.

A técnica de Árvores de Regressão tal como o nome indica, são graficamente semelhantes a uma árvore e seguem um conjunto de regras que começam num nó raiz e acabam nos nós terminais designados por folhas. Ao longo do percurso descendente são realizados testes nos nós até alcançar as folhas onde são fornecidas as previsões dos valores da variável de saída (Martins *et al.*, 2010).

A técnica de Regressões Múltiplas é uma técnica estatística simples que permite prever a variável dependente com base numa combinação linear de uma ou mais variáveis independentes. Devido à sua natureza aditiva, este modelo é muito fácil de interpretar e é amplamente utilizado em tarefas de regressão (Freitas *et al.*, 2015).

A técnica de Redes Neurais Artificiais utiliza uma arquitetura inspirada no cérebro humano. Os neurónios artificiais são interligados tendo cada ligação um peso que representa a força do sinal enviado (Martins *et al.*, 2010). Esta técnica mostrou um alto desempenho na modelação de mapeamentos não-lineares complexos e é robusta na exploração de dados de dispersão. É particularmente útil para problemas que não têm uma formulação analítica ou onde conhecimento explícito e acessível não existe (Freitas *et al.*, 2015).

A técnica de Máquinas de Vetores de Suporte foi proposto inicialmente para tarefas de classificação por Vladimir Vapnik e seus colaboradores. Posteriormente, após a introdução de uma função de perda alternativa, foi possível aplicar SVM a problemas de regressão (Freitas *et al.*, 2015). Esta técnica permite a transformação dos dados num grande espaço característico m-dimensional, usando um mapeamento não-linear, onde são selecionados vetores de suporte à previsão (Martins *et al.*, 2010).

A técnica k-Vizinhos Próximos representa uma das mais simples e intuitivas técnicas no campo da discriminação estatística. Este consiste num método não paramétrico, onde uma nova observação é localizada dentro de uma classe, a partir do conjunto de aprendizagem que é próximo com a nova observação, com respeito às medidas usadas. A determinação desta similaridade é baseada em medidas de distância (Martins e Almeida, 2009).

Os princípios formais das técnicas acima apresentadas estão esquematizados na Figura 13.

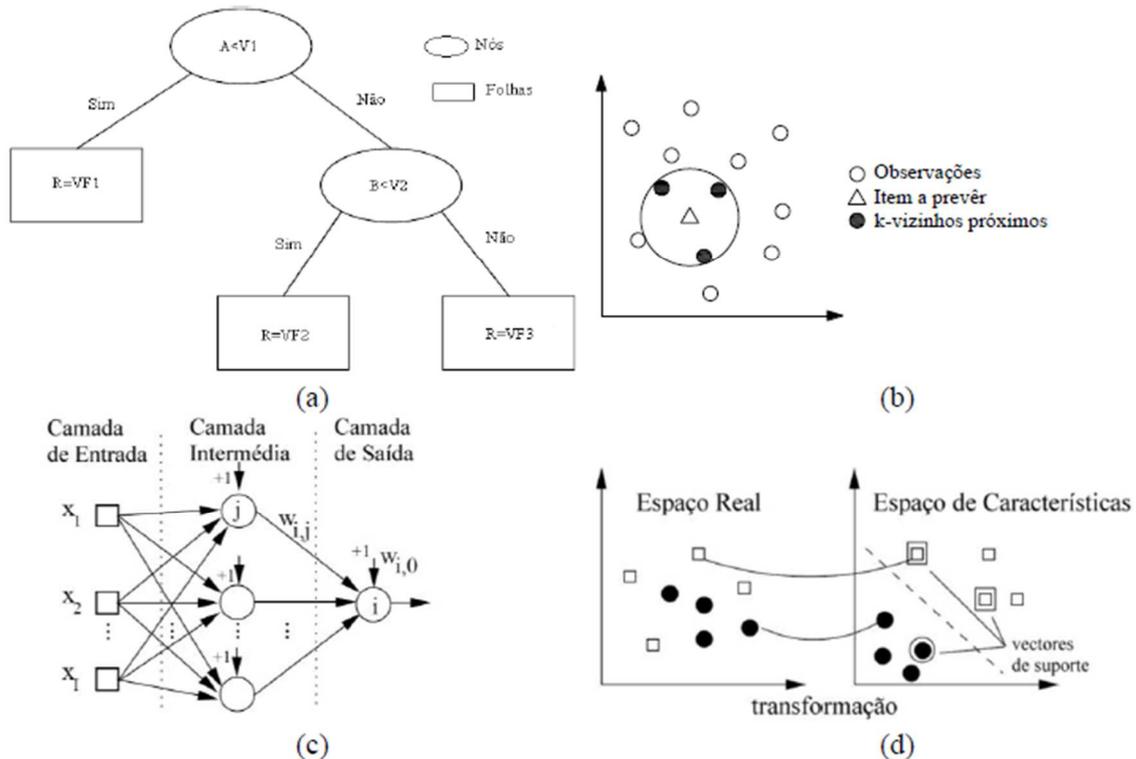


Figura 13 – Princípios formais das técnicas : (a) Árvores de Regressão, (b) k-Vizinhos Próximos, (c) Redes Neurais Artificiais e (d) Máquinas de Vetores de Suporte (Martins *et al.*, 2010)

No presente trabalho serão testadas as cinco técnicas de DM acima apresentadas de forma a assinalar quais as que conduzem a melhores resultados neste tipo de modelação.

### 2.9.2 Avaliação das técnicas

Para avaliar o desempenho das várias técnicas são representadas as curvas Características do Erro de Regressão, designadas por REC (Regression Error Characteristic), e calculadas medidas baseadas no erro (Martins *et al.*, 2010).

Numa tarefa de regressão, o principal objetivo é induzir um modelo que minimize a medição de erro entre os valores observados e previstos, considerando  $N$  exemplos (Freitas *et al.*, 2015).

As medidas baseadas no erro adotadas neste trabalho são o Desvio Absoluto Médio (DAM), o Erro Absoluto Relativo (EAR), o Erro Quadrático Médio Relativo (EQMR) e o coeficiente de correlação de Pearson (COR). Estas medidas são avaliadas pelas seguintes expressões (Martins *et al.*, 2010):

$$DAM = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \quad (7)$$

$$EAR = \frac{DAM}{\frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}_i|}{N}} \times 100\% \quad (8)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (9)$$

$$EQMR = \frac{REQM}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2}{N}}} \times 100\% \quad (10)$$

$$COR = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i) \times (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2 \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{\hat{y}}_i)^2}} \quad (11)$$

onde  $N$  designa o número de exemplos,  $y_i$  o valor desejado,  $\hat{y}_i$  o valor estimado pelo modelo em causa,  $\bar{y}_i$  a média dos valores desejados e  $\bar{\hat{y}}_i$  a média dos valores estimados.

### 2.9.3 Aplicações de técnicas *data mining*

As técnicas *data mining* podem ser aplicadas numa grande variedade de contextos de tomada de decisão. As áreas que mais têm explorado o uso das técnicas *data mining* são o marketing, vendas, finanças, manufaturas, saúde e energia (Thomé, 2008).

Estas técnicas permitem encontrar tendências e relações entre variáveis com o objetivo de prever seu estado futuro. Apesar do seu potencial, as técnicas de DM ainda não são amplamente utilizadas no transporte. Existem alguns exemplos de aplicação de técnicas de

DM como a Decisões de Gestão do Pavimento (Zhou *et al.*, 2009), e a previsão do ruído do tráfego rodoviário, como discutido em (Kumar *et al.*, 2011), o que levou a uma provável aplicação bem-sucedida do DM na modelagem de ruído pneu-pavimento (Freitas *et al.*, 2015).

### **3 METODOLOGIA DE ENSAIO**

#### **3.1 Avaliação do ruído pneu-pavimento**

##### **3.1.1 Considerações Gerais**

Atualmente, os locais onde as sociedades mais desenvolvidas se instalaram apresentam níveis de ruído que são considerados prejudiciais para o bem-estar e para a saúde humana. Para tal, existe um elevado número de estudos que visam controlar e reduzir esses níveis de ruído. Sendo o ruído ambiental, essencialmente, constituído pelo ruído de tráfego, este apresenta uma elevada complexidade no seu estudo, pois é dependente de vários fatores. Os estudos existentes consideram, fundamentalmente, a velocidade, o clima e o tipo de pavimento como os principais fatores influentes no ruído de tráfego. Contudo, os pavimentos rodoviários, com o passar do tempo perdem as suas características iniciais, degradando-se e desenvolvendo patologias que poderão ter uma elevada influência no ruído provocado pelo contacto pneu-pavimento. Para tal, neste trabalho pretende-se avaliar qual a influência dessas patologias, em diferentes tipos de pavimentos e distintas velocidades, no ruído pneu-pavimento, que será medido pelo método de proximidade imediata (CPX).

Neste capítulo são apresentadas as secções de estudo, ou seja, os pavimentos selecionados para análise e respetivas patologias. Apresentam-se também a metodologia de medição do ruído pneu-pavimento, do processamento e análise dos resultados, sendo expostos os respetivos equipamentos e programas computacionais.

##### **3.1.2 Aquisição do ruído pneu-pavimento**

O método utilizado para aquisição do ruído pneu-pavimento é o método da proximidade imediata, descrito na norma ISO 11819-2: 2000: “Acoustics – Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise – Part 2: Close – Proximity Method”.

Para a aquisição do ruído gerado pela interação pneu-pavimento foi realizada com recurso a dois microfones Free-field ½ Type 4190 conectados à plataforma portátil Pulse Type 3560-C através de cabos AO-0419, tudo da Brüel & Kjær. A plataforma Pulse era alimentada por

uma bateria portátil, e conectada, através de um cabo de rede, a um computador portátil. Os ensaios foram feitos com um pneu Continental ContiEcoContact3 195/65-R15 aplicado num veículo ligeiro, de forma a representar o ruído de tráfego normal da estrada.

A disposição dos microfones foi feita de acordo com os critérios impostos pela norma ISO/DIS 11819-2, 2012. Como foram utilizados apenas dois microfones, estes foram colocados na parte lateral do pneu com uma orientação de 45°, a 20 cm de distância do pneu e do seu centro, e a 10 cm da superfície do pavimento (Figura 14).



Figura 14 – Método CPX montado no pneu de ensaio

Os microfones foram conectados à plataforma Pulse, que por sua vez estava ligada ao computador portátil com o qual se controlavam as aquisições sonoras através do software Labshop 14.1.1 da Brüel & Kjær.

### 3.1.3 Trechos de estudo

Foram seleccionados 11 trechos, com diferentes tipos de pavimentos e patologias, sendo 3 trechos em Microbetão Betuminoso (MBB), 4 trechos em Betão Betuminoso (BB) e 4 trechos com Mistura de Betume Modificado com borracha (MBMB). As degradações

escolhidas foram a pele de crocodilo, desagregação e fendilhamento, representadas nas Figura 15, Figura 16 e Figura 17, sendo que também se considerou uma secção por tipo de pavimento sem qualquer patologia para referência (Tabela 2).

Tabela 2 – Pavimentos escolhidos e respetivas degradações.

Tipo de pavimento	Estrada	Trecho	Degradações			Sem degradação
			Pele de crocodilo	Desagregação	Fendilhamento	
BB	N207-4	1	X			X
	N105	2	X	X		X
	N206	3		X	X	
	N206	4	X			
MBMB	N14	5			X	X
	N14	6		X		
	N103	7			X	X
	N103	8	X	X		
MBB	N310	9	X		X	
	N310	10	X			
	N310	11		X	X	X



Figura 15 – Pavimento MBB com pele de crocodilo



Figura 16 – Pavimento MBMB com fendilhamento

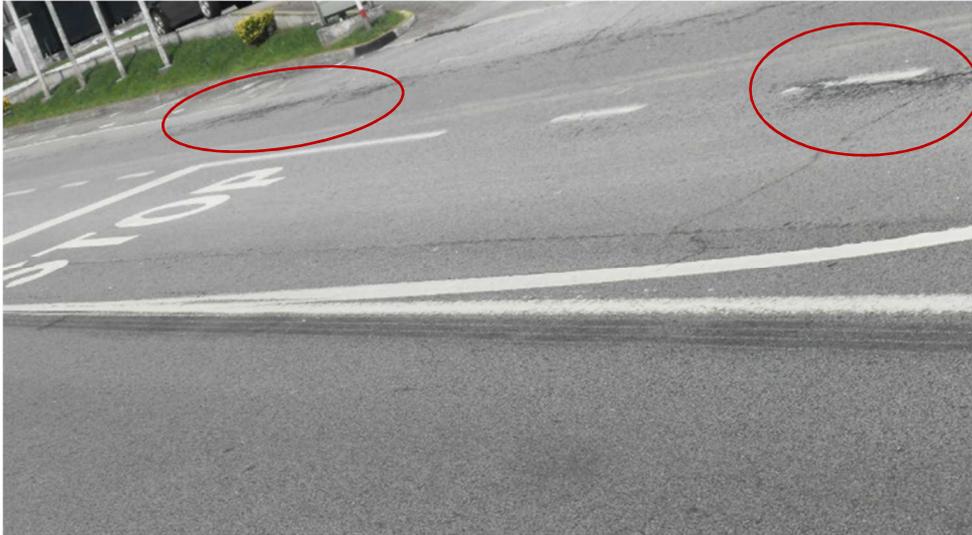


Figura 17 – Pavimento MBMB com desagregação

As aquisições foram feitas às velocidades de 30, 50 e 65km/h, de forma, a se poder comparar a evolução do ruído em pavimentos degradados com o aumento da velocidade.

Os fatores climáticos que influenciam o ruído rodoviário, cujos efeitos devem ser considerados na sua avaliação, são três: a temperatura do pavimento, a velocidade do vento e a quantidade de água presente na superfície de rolamento (Freitas *et al.*, 2006).

Quando são realizados ensaios para a avaliação do ruído, para que estes sejam válidos, deverão verificar-se certas condições climáticas. No caso do método CPX, sendo este o método utilizado nesta dissertação, recomenda-se que a velocidade do vento seja inferior a 5 km/h, a temperatura ambiente esteja compreendida entre os 5 e os 30°C, a superfície do pavimento esteja seca e a uma temperatura entre os 5 e os 50°C.

Os ensaios foram realizados no mês Julho sendo as condições climáticas as mais apropriadas, ou seja, o pavimento encontrava-se seco e o vento era praticamente inexistente, não influenciando o ruído gerado pelo contacto pneu-pavimento. De forma a controlar alguns dos parâmetros influentes no ruído pneu-pavimento foram realizados ensaios complementares. Sendo assim, durante a medição do ruído com o método CPX foi medida a temperatura do pavimento nos diferentes trechos com o auxílio de um termómetro Infravermelho Mastech de formato pistola e modelo MS-6530 (Figura 18).

As condições do pneu também influenciam o ruído, sendo assim é importante verificar a dureza da borracha que este possui, ou seja, a dureza do pneu, que deverá encontrar-se entre 20 e 90 shore A. Para a sua medição recorre-se a um durómetro, este poderá ser analógico ou digital, sendo neste caso utilizado o durómetro digital. Após serem realizadas várias medições realizou-se média das várias durezas, sendo 66.9 e 66.8 shore A a dureza a que se encontrava o pneu nos diferentes trechos.

Para a realização deste ensaio foram escolhidas as velocidades de 30, 50 e 65 km/h, por se tratar trechos situados em estradas nacionais, sendo assim possível representar as velocidades praticadas quando as vias se encontram desimpedidas ou obstruídas. Apesar destas serem as velocidades escolhidas é, em termos práticos, improvável a sua execução exata. Para que posteriormente a análise dos dados fosse feita de forma mais realista foi a medida a velocidade exata nos diferentes trechos, para tal recorreu-se a um radar de velocidades tipo pistola da Bushnell (Figura 19).



Figura 18 – Termómetro infravermelho de pistola



Figura 19 – Radar de velocidade do tipo pistola

Em cada trecho as medições do ruído pelo método CPX efetuadas a cada nível de velocidade foram repetidas pelo menos duas vezes. A duração do ficheiro de som depende da extensão da degradação sendo que, para efeitos de análise se considera apenas um excerto de 5 segundos, que é tempo mínimo necessário para o cálculo dos indicadores psicoacústicos.

### 3.1.4 Processamento e análise dos dados

O ruído medido foi registado e parcialmente processado no software Labshop, donde se obteve, para além dos ficheiros de som em formato *wave*, o nível de pressão sonora, em

dB(A) e em dB. Estes ficheiros foram escutados e analisados. Seguiu-se a extração dos excertos de 5 segundos através do programa Audicity.

Com os ficheiros de som com tamanhos iguais torna-se possível retirar os indicadores acústicos, tais como os níveis de pressão sonora equivalente e máximos, e os indicadores psicoacústicos tais como o *loudness*, *sharpness* e *roughness*, permitindo assim uma análise mais detalhada do som.

Os indicadores foram retirados com recurso à aplicação Psysound3 executada no programa Matlab 7.13.0.564. Este software para a análise de gravações de som usando algoritmos físicos e psicoacústicos, executa análises precisas com uma fácil aplicação. Esta aplicação funciona em 4 passos, sendo no primeiro passo, *Files*, onde são selecionados os ficheiros de som a analisar. No segundo passo, *Calibration*, faz-se a seleção do ficheiro de calibração e indica-se o respetivo nível de pressão sonora. No terceiro passo, *Analysers*, são selecionadas as análises que se pretende executar nos ficheiros. Por fim, o último passo, *Post Processing* fornece um resumo básico dos resultados de cada ficheiro.

Para a calibração dos ficheiros de som foi utilizado o nível de pressão sonora retirado a partir do software Labshop, e cada ficheiro de som foi calibrado com ele próprio e respetivo valor de nível de pressão sonora a ele associado.

Segundo a descrição da aplicação PsySound3, o *Sound Level Meter* emula um medidor de nível de som com filtros de ponderação selecionados pelo utilizador da aplicação (A, B, C, Z) e tempos de integração (rápido e lento). Os dados calculados são séries de tempo correspondente às configurações de análise selecionados. Os resultados obtidos no PsySound3 são todos os valores ao longo do espetro. Assim sendo, com recurso ao software MatLab, os valores de  $L_{eq}$  resultam da média do nível sonoro ao longo da medição, este é expresso em dB(A) e em dB, enquanto que os valores de  $L_{max}$  são o nível máximo de pressão sonora do ficheiro de 5 segundos, sendo estes expressos em dB(A) .

O modelo de cálculo de *loudness* escolhido foi o *Dynamic Loudness C & F*, este modelo implementa o modelo dinâmico da intensidade de Chalupper e Fastl. Os cálculos utilizam a escala Bark de bandas críticas e a integração temporal auditiva está incluída no modelo (Cabrera *et al.*, 2007).

A Figura 20 apresenta, como exemplo, a representação gráfica do *loudness* principal médio de um dos casos de estudo, obtidos pelo modelo de *loudness CF* do PsySound3, através do MatLab.

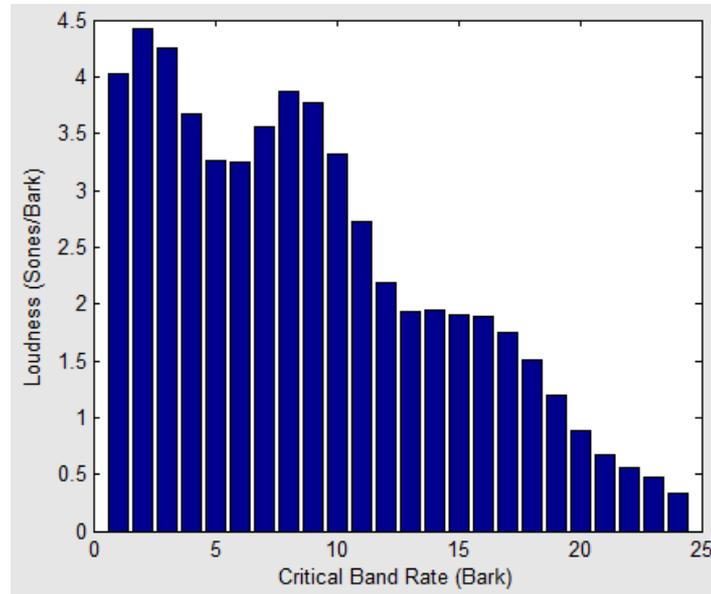


Figura 20 – Representação gráfica do *loudness* (expresso em sone/bark) médio obtido pelo modelo *Loudness CF*

O *loudness* principal médio apresenta uma distribuição de *loudness* através da banda crítica e é expresso em sone/bark. O valor de *loudness* total de um sinal (em Sones) é dado pelo integral da curva de *loudness* ao longo do eixo de frequência  $z$ , segundo a

$$S = \int_0^{24 \text{ Barks}} S' dz \quad (12)$$

Onde:

$S$  é o *loudness* total, expresso em sone

$S'$  é o *loudness* principal médio, expresso em sone/Bark.

Para a análise do *Sharpness*, utilizou-se dois dos modelos disponíveis no software PsySound3, o modelo de cálculo de *Dynamic Loudness (C & F)*, de Chalupper e Fastl, e o modelo *Loudness (MG & B PsySound2)*, de Moore, Glasberg e Baer.

Para a análise dos dois modelos diferentes foi calculada a média do *Sharpness*, em acum, para os 5 segundos do ficheiro de som. Por vezes, os primeiros ou os últimos segundos da medição, foram excluídos por apresentarem valores discrepantes dos restantes valores.

Relativamente ao *Roughness*, utilizou-se um modelo disponível no software PsySound3, o modelo de cálculo de *Roughness (D & W)*, que implementa o algoritmo de rugosidade de Daniel e Weber (1997).

Assim como no *Sharpness*, o *Roughness* foi calculado através da média do *Roughness*, em aspers, para os 5 segundos do ficheiro de som. Por vezes, os primeiros ou os últimos segundos da medição, foram excluídos por apresentarem valores discrepantes dos restantes valores.

## **3.2 Avaliação da textura da superfície do pavimento**

### **3.2.1 Considerações gerais**

A superfície do pavimento tem um efeito significativo no ruído provocado pelo contacto pneu-pavimento, sendo assim, torna-se importante o estudo das características dessa superfície. Deste modo, o método de caracterização das propriedades da textura de superfícies de estrada é imprescindível para o estudo do ruído pneu-pavimento (Santos, 2007).

Para a caracterização desta propriedade existe um conjunto de métodos, sendo os mais utilizados: o método da mancha de areia e os perfilómetros a laser. Neste trabalho foi utilizado o perfilómetro a laser que se descreve a seguir.

### **3.2.2 Caracterização da textura com o perfilómetro a laser**

Para a caracterização da textura foi utilizado o, equipamento da Universidade do Minho, perfilómetro a laser a alta velocidade. Este equipamento utiliza um sensor eletro-ótico, montado na parte dianteira de um veículo apropriado, controlado por um computador, para medir o feixe de laser refletido do pavimento ao longo de um trajeto linear. Este equipamento permite efetuar medições a altas velocidades e recolher diversos parâmetros, tais como, profundidade média do perfil, nos rodados esquerdo e direito, regularidade longitudinal,

profundidade das rodeiras e outros parâmetros geométricos, tais como, a inclinação da estrada.



Figura 21 – Perfilómetro a laser, equipamento da Universidade do Minho

O ensaio realizado com o perfilómetro a laser baseou-se no projeto de norma ISO/CD 13473-1 para a determinação da profundidade média da textura. Este ensaio não foi realizado em simultâneo com o ensaio do método de proximidade imediata, na aquisição do ruído pneu-pavimento, mas foi realizado alguns dias depois, de forma a não haver grandes alterações das características da superfície do pavimento. A caracterização da textura foi executada nos mesmos 11 trechos em que foi recolhido o ruído pneu-pavimento.

### 3.2.3 Processamento e análise de dados

Com os dados fornecidos pelo perfilómetro a laser é possível calcular a Profundidade Média do Perfil (Mean Profile Depth – MPD). A profundidade do perfil representa o desvio médio de uma superfície de estrada totalmente plana, dentro de qualquer categoria de textura (micro, macro e mega-textura) (Santos, 2007). Na Figura 22 apresenta-se a título de exemplo os resultados obtidos para um trecho.

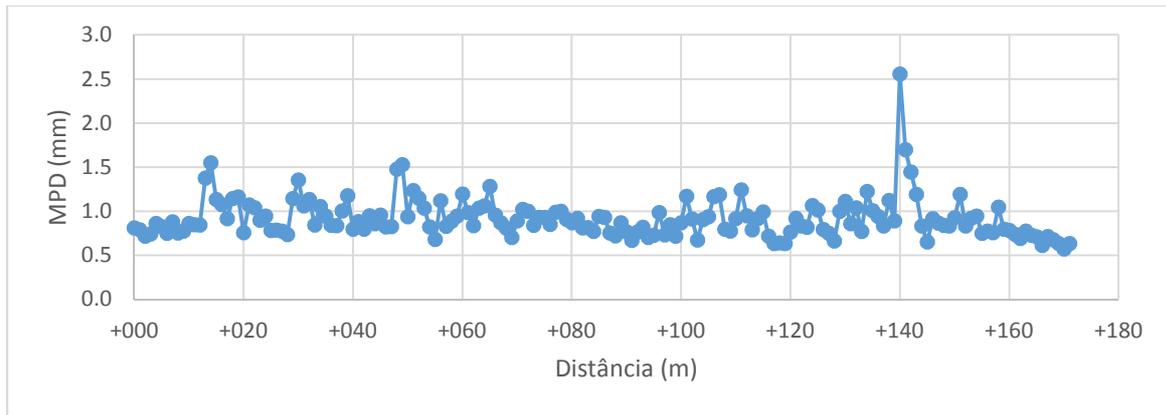


Figura 22 – Representação gráfica de MPD (expresso em mm) em função da distância (expresso em m)

O valor de profundidade média do perfil associado a cada trecho foi calculado em função das zonas com maior profundidade pois será a zona correspondente à localização de patologias. Foi também tido em conta as velocidades, pois os ensaios de aquisição do ruído pneu-pavimento foram realizados às velocidades de 30, 50 e 65 km/h e recortados em períodos de 5 segundos. Deste modo, aplicou-se a média dos valores de profundidade associados, a uma extensão de 42 metros, 70 metros e 91 metros para as respetivas velocidades de 30, 50 e 65 km/h. Na Tabela 3 estão expressos os valores de profundidade média do perfil, para as respetivas velocidades, em cada tipo de pavimento e respetivas degradações.

Tabela 3 – Valores de MPD (expresso em mm) para cada trecho de estudo

Tipo de pavimento	Estrada	Patologia	Velocidade			
			30 km/h	50 km/h	65 km/h	
Betão Betuminoso	N105	Pele de crocodilo	2.3	2.1	1.9	
		Desagregação	1.3	1.2	1.1	
		Nenhuma	1.0	1.0	1.0	
	N206	Fendilhamento	1.6	1.5	1.4	
		Desagregação	1.8	1.6	1.5	
		Pele de crocodilo	1.8	1.5	1.3	
	N207-4	Pele de crocodilo	1.0	0.9	0.9	
		Nenhuma	-	0.9	-	
	Mistura Betuminosa Modificada com Borracha	N14	Fendilhamento	1.6	1.5	1.5
			Nenhuma	1.3	1.3	1.2
Desagregação			2.2	2.1	2.0	
N103		Fendilhamento	1.1	1.0	1.0	
		Nenhuma	1.1	1.0	1.0	
		Pele de crocodilo	1.8	1.7	1.6	
		Desagregação	1.8	1.7	1.6	
Microbetão Betuminoso		N310	Fendilhamento	1.4	1.4	1.4
	Pele de crocodilo		1.4	1.4	1.4	
	Pele de crocodilo		1.6	1.5	1.4	
	Fendilhamento		1.1	1.1	1.1	
	Desagregação		1.4	1.3	1.3	
	Nenhuma		1.0	1.0	1.0	

### 3.3 Modelação do ruído pneu-pavimento

#### 3.3.1 Considerações gerais

O ruído pneu-pavimento é um importante fator no ruído de tráfego logo torna-se importante a sua modelação, para tal, existem atualmente técnicas como é o caso das técnicas DM, que permitem extrair modelos de dados com relações complexas e que proporcionam bons resultados (Freitas *et al.*, 2012b).

Neste capítulo são apresentadas as variáveis consideradas nos modelos e as respetivas técnicas aplicadas.

#### 3.3.2 Processamento e análise de dados

Para a modelação do ruído foram utilizadas as técnicas DM aplicadas no programa R, versão 2.11.1. As técnicas DM usadas para a modelação do ruído pneu-pavimento foram: Árvores de Regressão (RT), Regressões Múltiplas (MR), Redes Neurais Artificiais (NN), Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) e k-Vizinhos Próximos (KNN).

Neste estudo, numa primeira fase, para comparar a capacidade de previsão das diferentes técnicas, foi usado um processo de validação cruzada em que o conjunto total de dados foi dividido em dez subconjuntos iguais, sendo nove conjuntos usados para treino e um conjunto para teste. Este processo foi repetido 10 vezes sendo os erros finais dados pela média dos erros obtidos com os subconjuntos de teste. Para além dos erros também foi calculado o coeficiente de correlação, COR. Neste processo, a técnica de DM com maior capacidade preditiva é aquela que conduz a menores erros e a maior coeficiente de correlação. Numa segunda fase, os modelos foram ajustados usando todo o conjunto de dados.

Para a aplicação das técnicas DM foi criada uma base de dados, em que as variáveis eram o tipo de pavimento (BB, MBB e MBMB), as patologias existentes (nenhuma degradação, fendilhamento, pele crocodilo, pele crocodilo com ninhos e desagregação), a textura, retirada da análise com o perfilómetro de laser, e com os indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados a partir da aplicação PsySound3.

Como se pode constatar na Tabela 4, foram feitas análises com quatro base de dados, sendo a primeira executada com todos os dados, isto é, considerando todas velocidades praticadas, para as restantes análises foram repartidos os dados segundo as respetivas velocidades.

Tabela 4 – Identificação das variáveis de entrada e de saída para cada combinação

	Combinação	Variáveis de entrada				Variáveis de saída
		Tipo de pavimento	Patologias	Textura	Velocidade	
<b>Vel. Todas</b>	1	X	X	X	X	Leq; LAeq;
	2	X	X		X	LAmáx;
	3	X	X	X		<i>Loudness</i> ;
	4		X	X	X	<i>Sharpness CF</i> ;
	5		X		X	<i>Sharpness MG</i> ;
	6				X	<i>Roughness</i> ;
<b>Vel. 30 km/h</b>	7	X	X	X	X	Leq; LAeq;
	8	X	X		X	LAmáx;
	9	X	X	X		<i>Loudness</i> ;
	10		X	X	X	<i>Sharpness CF</i> ;
	11		X		X	<i>Sharpness MG</i> ;
<b>Vel. 50 km/h</b>	12	X	X	X	X	<i>Roughness</i> ;
	13	X	X		X	Leq; LAeq;
	14	X	X	X		LAmáx;
	15		X	X	X	<i>Loudness</i> ;
	16		X		X	<i>Sharpness CF</i> ;
<b>Vel. 65 km/h</b>	17	X	X	X	X	<i>Sharpness MG</i> ;
	18	X	X		X	<i>Roughness</i> ;
	19	X	X	X		Leq; LAeq;
	20		X	X	X	LAmáx;
	21		X		X	<i>Loudness</i> ;

Deste modo, fez-se uma primeira análise com todas as velocidades, uma segunda análise em que estão agrupados os dados referentes à velocidade de 30 km/h, uma terceira análise em que estão agrupados os dados referentes à velocidade de 50 km/h e uma quarta análise em que estão agrupados os dados de referentes à velocidade 65 km/h. Para cada base de dados foram executadas 6 combinações, fazendo variar as variáveis de entrada (tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade). Como variáveis de saída foram analisados sete indicadores, sendo assim foram executadas um total de 168 análises, fazendo variar para além da base de dados, as variáveis de entrada e de saída.

## **4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS**

### **4.1 Enquadramento metodológico**

A realização deste ensaio, teve como objetivo a avaliação do impacto das degradações no ruído provocado pelo contacto pneu-pavimento, para tal foram escolhidas 11 zonas com 3 tipos de pavimento distintos, e 3 tipos de degradações.

Os valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3 e respetivas velocidades praticadas e textura da superfície encontram-se no Anexo I.

Neste capítulo será feito um estudo detalhado dos resultados obtidos nas aquisições de ruído. De forma a permitir uma fácil interpretação dos resultados obtidos, optou-se por uma análise gráfica dos mesmos.

Inicialmente será efetuada uma análise mais generalizada, sendo avaliada a textura em função das degradações para os diferentes tipos de pavimentos. Posteriormente será avaliada a influência do tipo de pavimento nos indicadores acústicos e psicoacústicos em função da velocidade, o efeito das degradações nos indicadores acústicos e psicoacústicos em função da velocidade, o efeito das degradações nos indicadores acústicos e psicoacústicos em função da textura. Por fim, será efetuada uma análise dos resultados obtidos para distintos modelos da aplicação das técnicas data mining, sendo avaliado o desempenho das diferentes técnicas e das importâncias das variáveis de entrada em função das velocidades e dos indicadores.

Em alguns casos, agrupou-se os indicadores conforme as velocidades praticadas, de forma a que os resultados sejam divididos em três escalas de velocidades, de 30, 50 e 65 km/h. Ou seja, as velocidades praticadas dos 30 aos 35 km/h, dos 44 aos 55 km/h e dos 56 aos 66 km/h correspondem, respetivamente, ao grupo das velocidades de 30, 50 e 65 km/h.

## 4.2 Avaliação da textura em função das degradações para os diferentes pavimentos

A Figura 23 apresenta a média referente aos diversos locais da profundidade média do perfil, calculada segundo a média de várias medições, para os pavimentos em BB, MBB e MBMB, em função do tipo de degradação.

Pode-se constatar, segundo a Figura 23, que as degradações mais gravosas influenciam a textura. Observa-se que para qualquer tipo de pavimento, sendo em BB, MBMB e MBB, existe um aumento dos valores de profundidade média do perfil para as patologias (fendilhamento, desagregação e pele de crocodilo), comparativamente aos valores obtidos para o pavimento sem qualquer tipo de degradação. Os valores mais altos da profundidade média do perfil estão associados ao pavimento em MBMB, sendo a desagregação a patologia com maiores valores de profundidade média. O pavimento em BB apresenta maiores valores de profundidade média para pavimentos fendilhados ou com desagregação, no entanto pavimentos em MBB apresentam valores mais elevados nos pavimentos com pele de crocodilo.

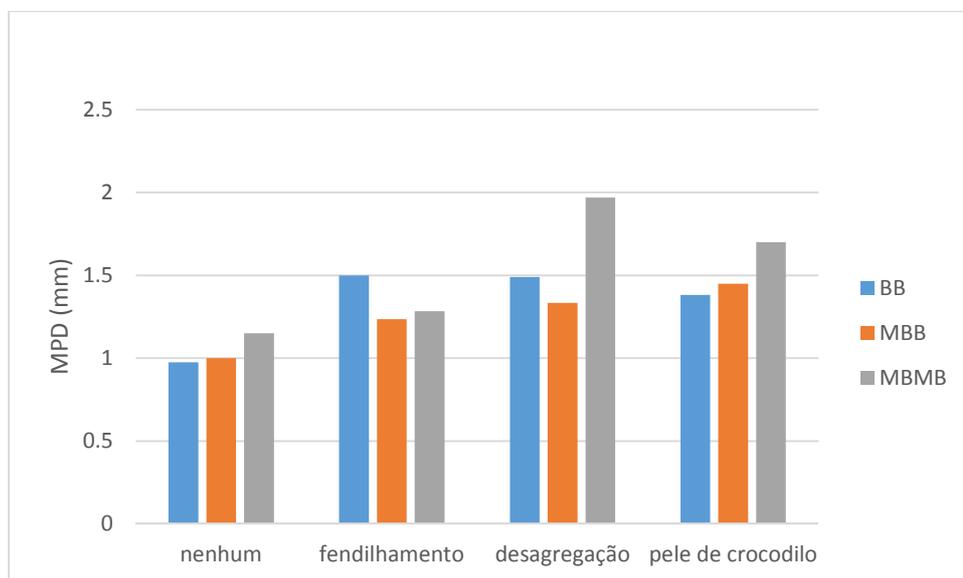


Figura 23 – Profundidade média do perfil de diferentes pavimentos em função das degradações

### **4.3 Influência do tipo de pavimento nos indicadores acústicos e psicoacústicos em função da velocidade**

Apesar dos níveis de degradação não serem exatamente os mesmos, isto é, as fendas ou a pele de crocodilo num pavimento não são iguais às presentes noutra tipo de pavimento, é possível analisar e comparar o comportamento de cada pavimento conforme a sua constituição e patologia.

Para simplificar, calculou-se a média dos indicadores em função da velocidade, agrupando os resultados em função das velocidades (30, 50 e 65 km/h).

#### **4.3.1 Nível de pressão sonora equivalente, em dB**

As Figura 24, Figura 25 e Figura 26 representam os níveis de pressão sonora, em dB, sem a ponderação do filtro A, para diferentes patologias e pavimentos, em função da velocidade. No caso do pavimento de BB existe uma discrepância de valores, particularmente à velocidade de 50 km/h, sendo possível constatar-se um possível erro na análise do som, ou seja, o ficheiro de som recolhido poderá estar afetado com ruídos de fundo. O máximo e mínimo valor de nível de pressão sonora equivalente, é de 105.70 dB e 90.60 dB, respetivamente, sendo o máximo associado ao pavimento em MBMB e o mínimo ao pavimento em MBB. O valor máximo corresponde a um pavimento com pele de crocodilo a uma velocidade de 65 km/h e mínimo a um pavimento sem qualquer tipo de desagregação à velocidade de 30 km/h. Os 3 tipos de pavimento apresentam um aumento dos níveis de pressão sonora em função velocidade. Contudo, pode-se comprovar que os pavimentos em MBB e MBMB apresentam níveis de pressão sonora ligeiramente superiores ao pavimento BB.

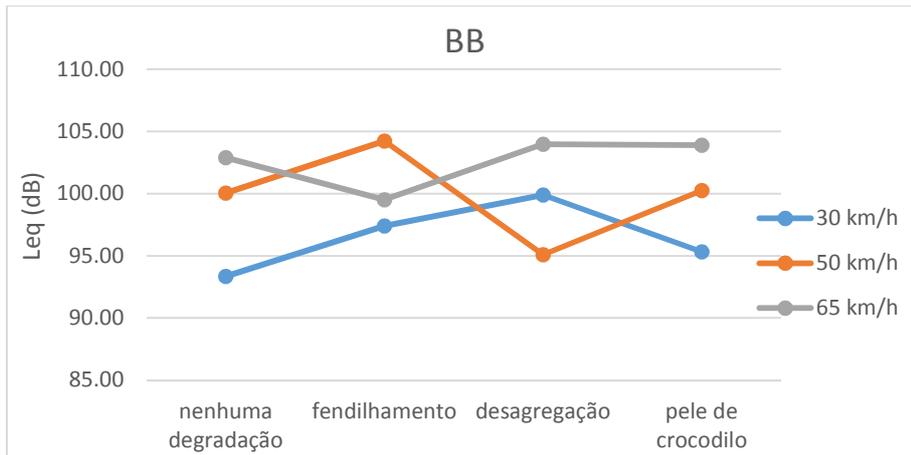


Figura 24 – Leq do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

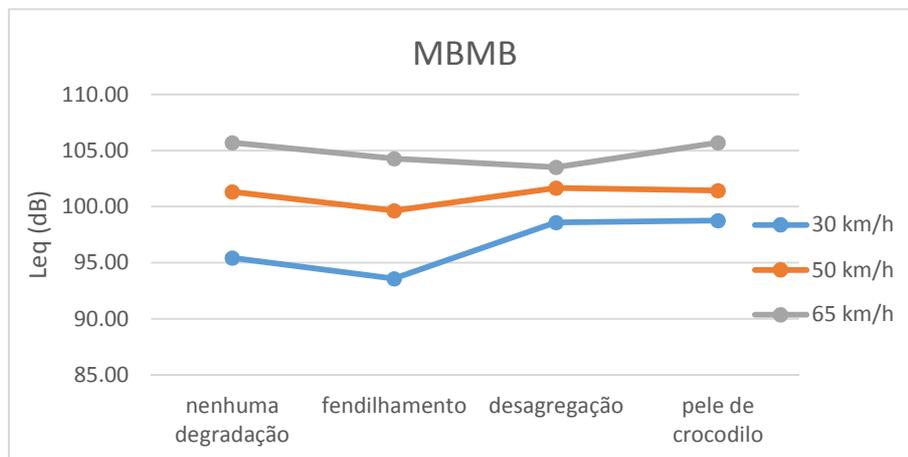


Figura 25 – Leq do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

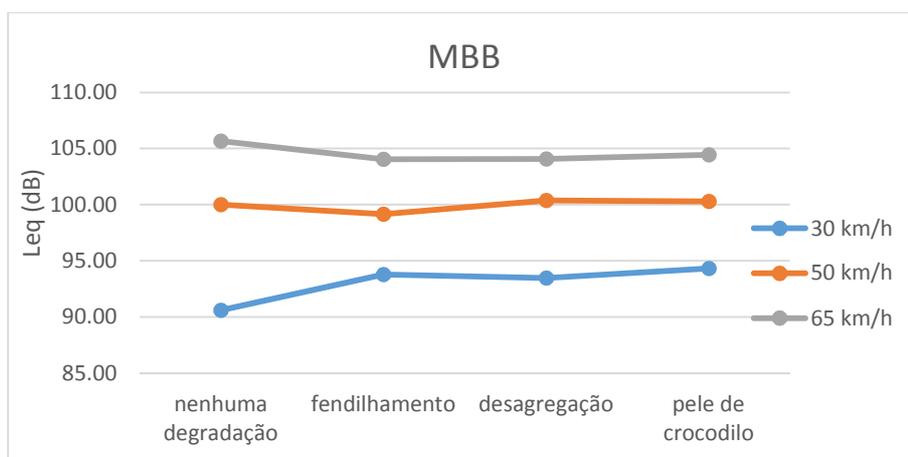


Figura 26 – Leq do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

### 4.3.2 Nível de pressão sonora, em dB(A)

As Figura 27, Figura 28 e Figura 29, representam os níveis de pressão sonora, em dB(A), para diferentes patologias e pavimentos, em função da velocidade. Como existe a aplicação do filtro de ponderação A, a gama de valores do nível de pressão sonora, em dB(A) é inferior ao nível de pressão sonora equivalente, em dB. O máximo e mínimo valor de nível de pressão sonora equivalente, é de 97.50 dB(A) e 80.01 dB(A), sendo estes associados ao pavimento em MBB. O valor máximo e mínimo correspondem a um pavimento sem degradações, com velocidades de 65 km/h e 30 km/h, respetivamente. Assim como no nível de pressão sonora, em dB, os pavimentos que apresentam maiores níveis de pressão sonora, dB(A), são os MBB e MBMB.

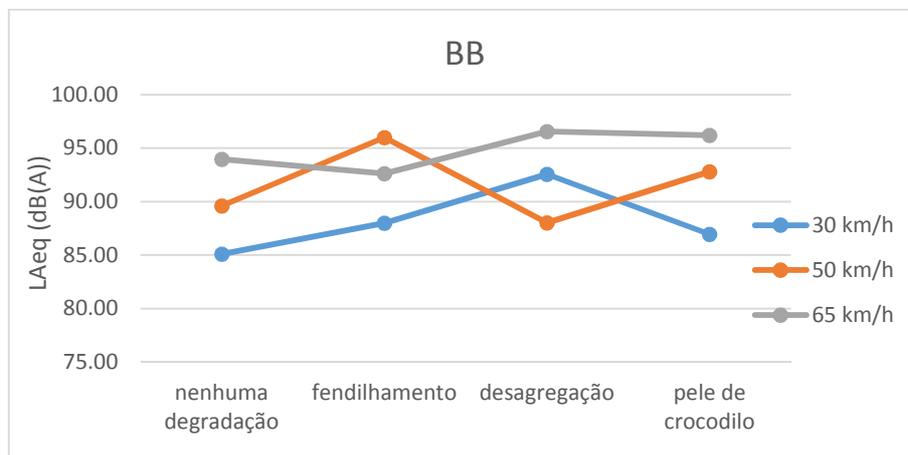


Figura 27 – LAeq do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

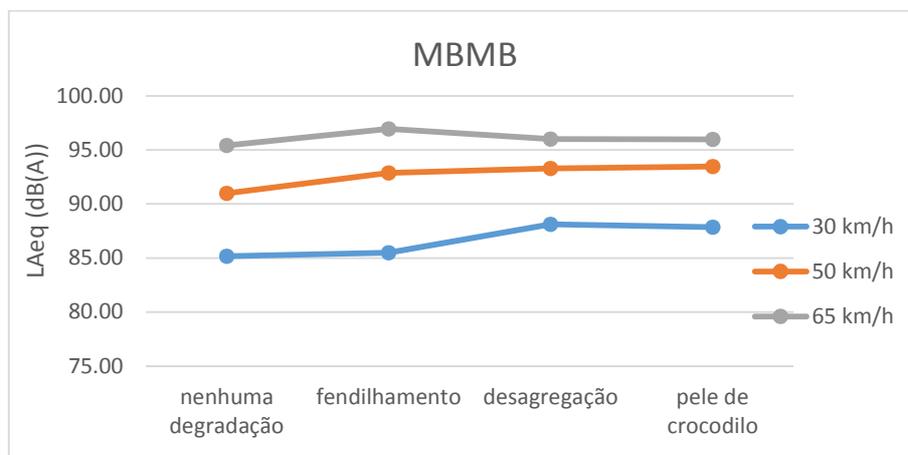


Figura 28 – LAeq do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

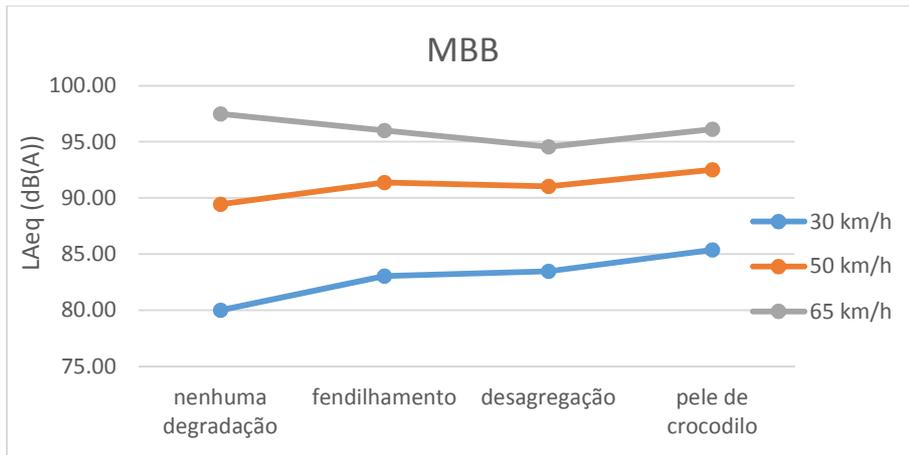


Figura 29 – LAeq do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

#### 4.3.3 Nível de pressão sonora máxima, em dB(A)

As Figura 30, Figura 31 e Figura 32 representam os níveis de pressão sonora máximos, em dB(A), para diferentes patologias e pavimentos, em função da velocidade. O máximo e mínimo valor de nível de pressão sonora máxima, é de 98.31 dB(A) e 80.45 dB(A) sendo estes associados ao pavimento em MBB. O valor máximo e mínimo correspondem a um pavimento sem degradações, com velocidades de 65 km/h e 30 km/h, respetivamente. Assim como no nível de pressão sonora, em dB, e nível de pressão sonora, em dB(A), os pavimentos que apresentam maiores níveis de pressão sonora máximos, são os BB e MBB. Em termos gerais observa-se um ligeiro aumento do ruído na presença de grande parte das degradações nos três tipos de pavimentos.

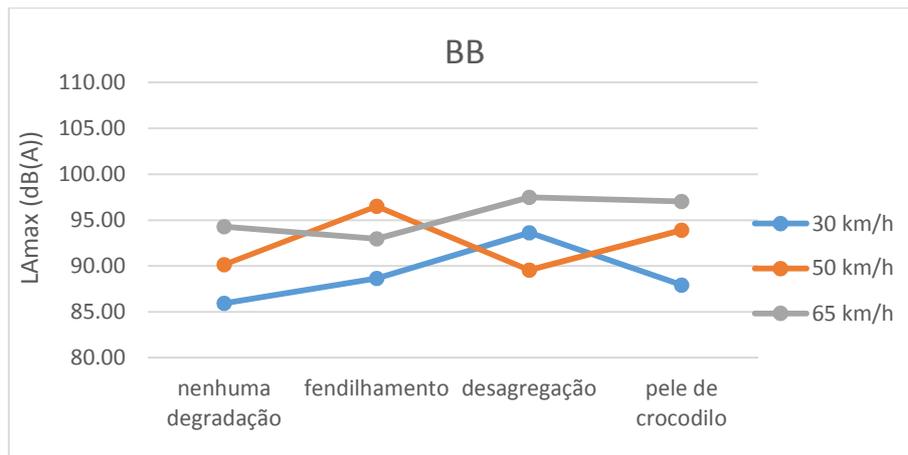


Figura 30 – LAmox do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

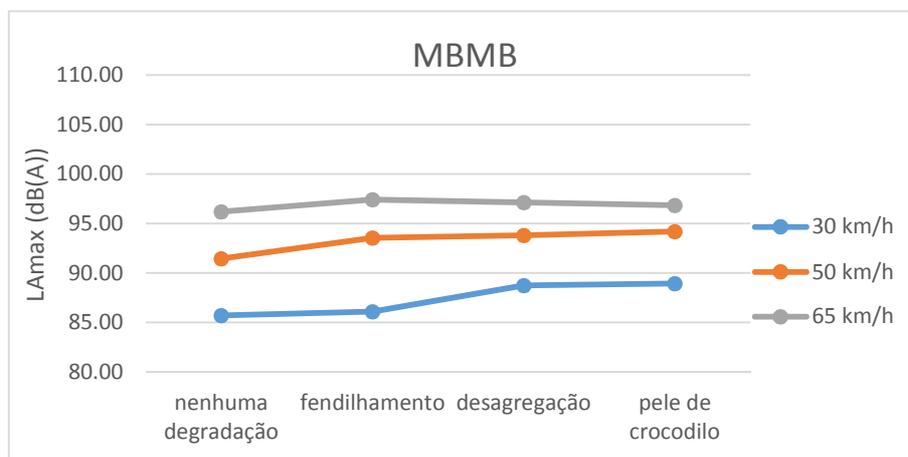


Figura 31 – LAmox do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

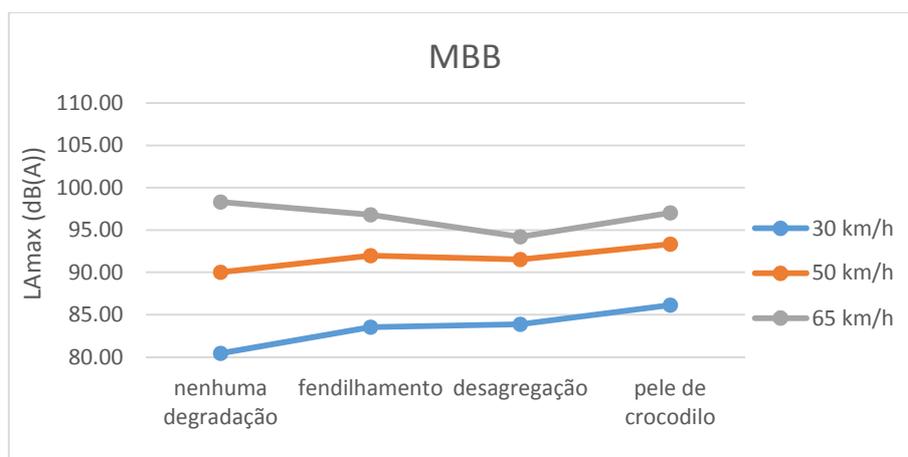


Figura 32 – LAmox do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

#### 4.3.4 Loudness, em Sone

As Figura 33, Figura 34 e Figura 35 representam o *Loudness*, em Sone, para diferentes patologias e pavimentos, em função da velocidade. O máximo valor de *Loudness* é 94.06 Sone e corresponde ao pavimento em MBB sem degradações a 65 km/h, o valor mínimo é 37.15 Sone e corresponde ao mesmo pavimento sem degradações, mas a 30 km/h. Os pavimentos que apresentam maiores valores de *Loudness* são os pavimentos em MBB e MBMB. Este indicador continua a ter uma evolução em função da velocidade semelhante aos indicadores acústicos.

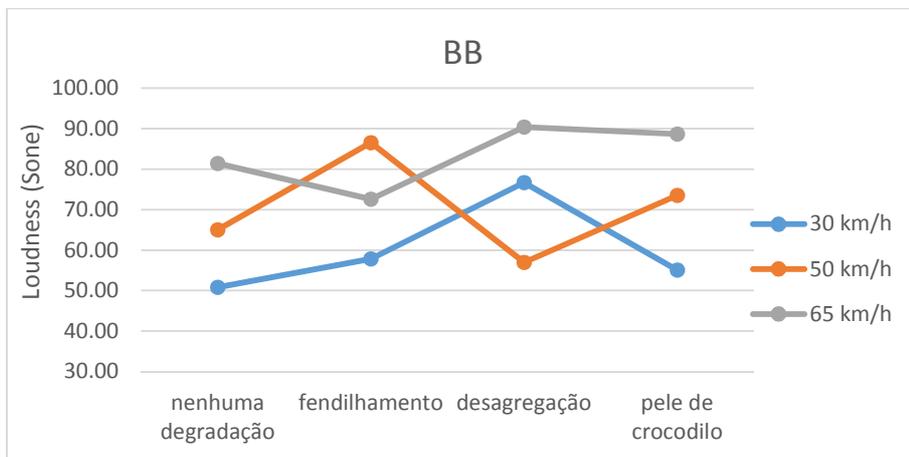


Figura 33 – *Loudness* do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

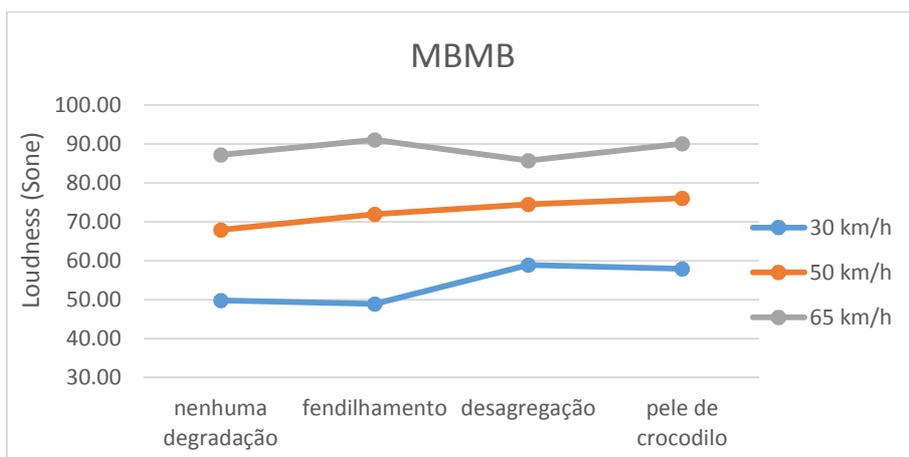


Figura 34 – *Loudness* do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

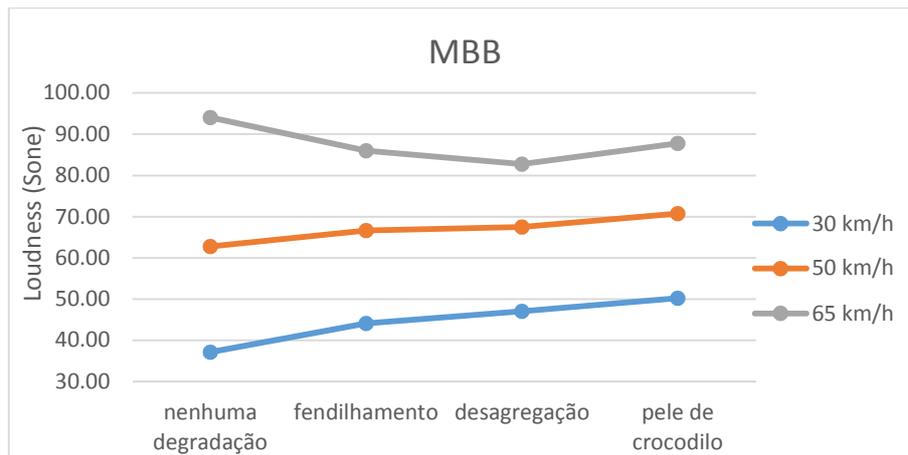


Figura 35 – *Loudness* do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

#### 4.3.5 *Roughness*, em aspers

As Figura 36, Figura 37 e Figura 38 representam os valores *Roughness*, em aspers, para diferentes patologias e pavimentos, em função da velocidade. O valor máximo de *Roughness* é 0.36 asper e corresponde a um pavimento em MBMB com desagregação a 30 km/h, o valor mínimo de 0.11 asper corresponde a um pavimento em BB sem qualquer tipo de degradação a 30 km/h. Este indicador psicoacústico, da mesma forma que os outros indicadores, apresenta os valores mais elevados nos pavimentos em MBMB e MBB. Para este indicador não existe uma evolução perceptível com a velocidade, os valores mais altos estão associados a velocidades mais reduzidas.

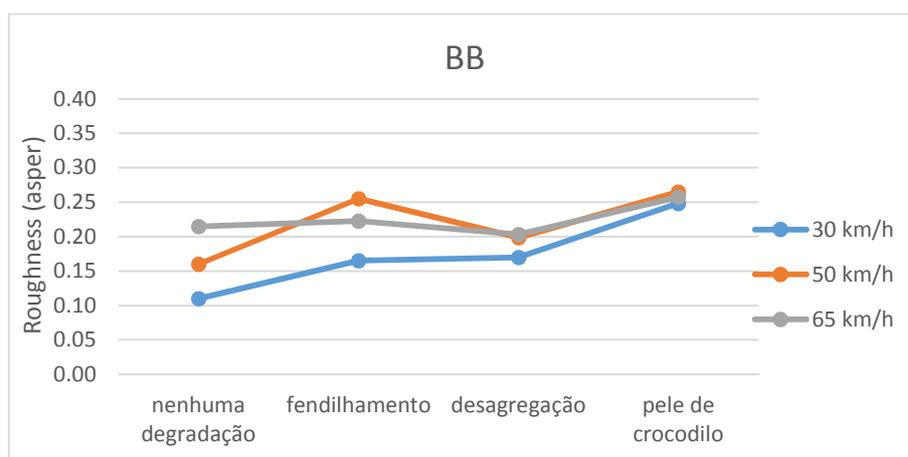


Figura 36 – *Roughness* do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

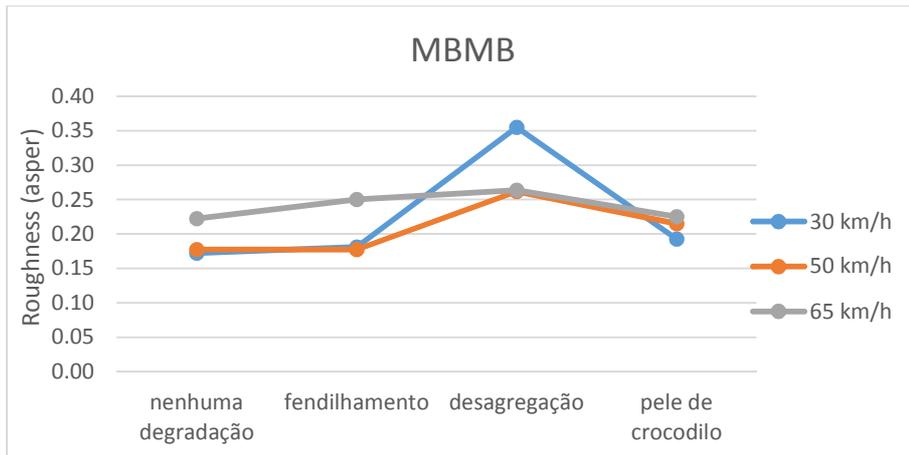


Figura 37 – *Roughness* do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

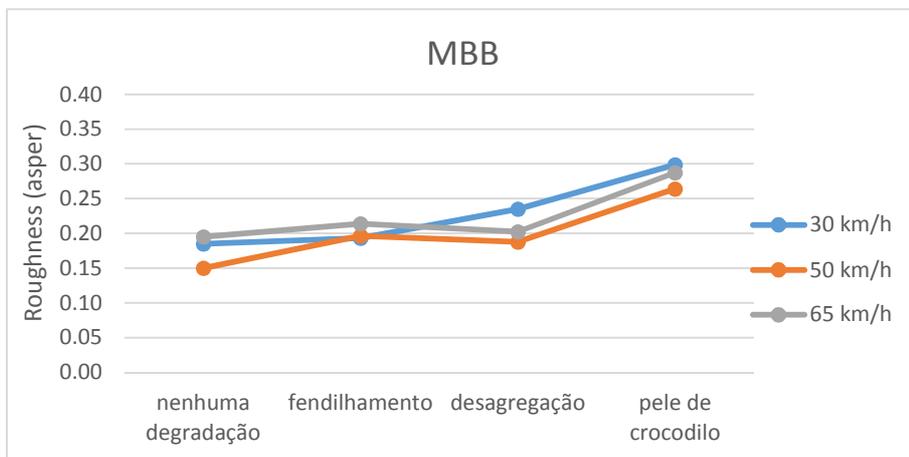


Figura 38 – *Roughness* do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

#### 4.3.6 *Sharpness CF*, em acum

As Figura 39, Figura 40 e Figura 41 representam os valores *Sharpness* calculados segundo o modelo de Chalupper e Fastl, em acum, para diferentes patologias e pavimentos, em função da velocidade. Este indicador já apresenta uma evolução mais explícita em função da velocidade, sendo os valores mais elevados associados a velocidades mais altas. O valor máximo de *Sharpness* é 1.21 acum e corresponde ao pavimento em BB com desagregação à velocidade de 65 km/h. O valor mínimo é 1.11 acum e corresponde ao pavimento em MBMB com desagregação à velocidade de 30 km/h. Para este indicador os valores mais elevados estão situados no pavimento em BB, exceto no caso do pavimento em MBMB com

fendilhamento. Neste indicador não parece haver um padrão na sua alteração em função do tipo de degradação.

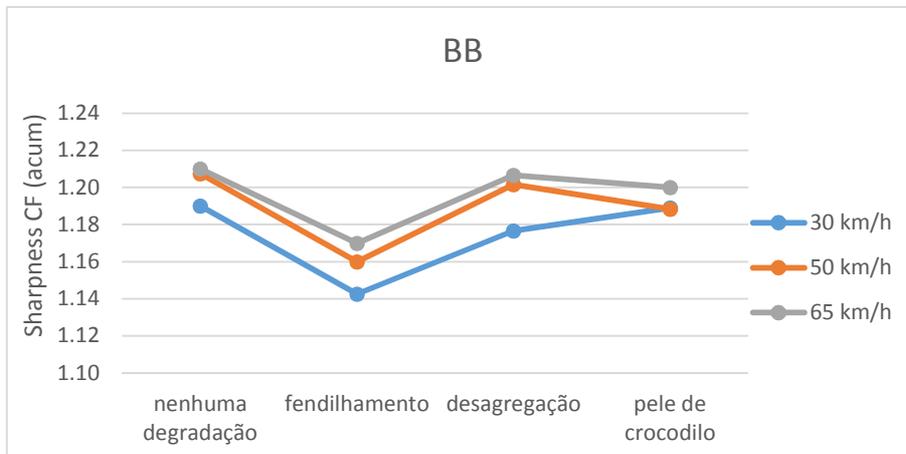


Figura 39 – *Sharpness CF* do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

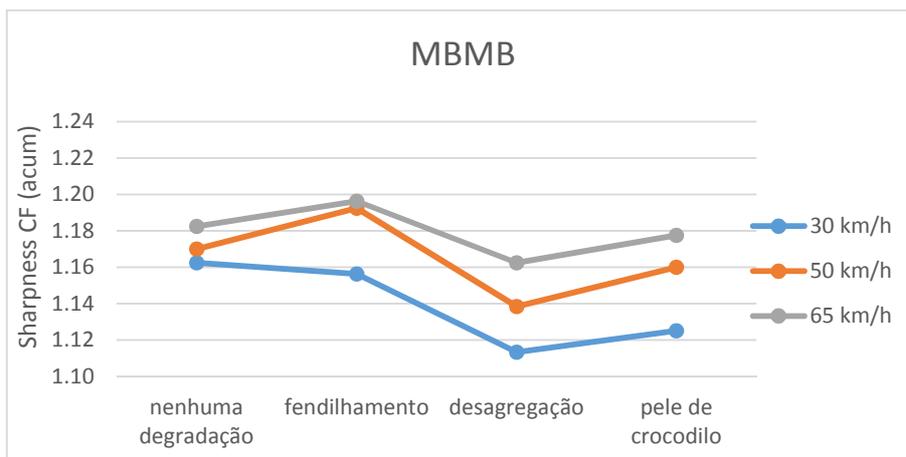


Figura 40 – *Sharpness CF* do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

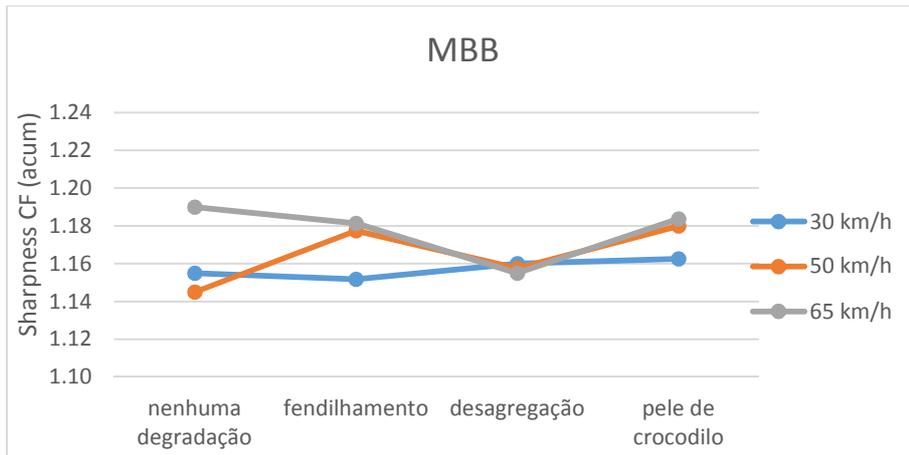


Figura 41 – *Sharpness CF* do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

#### 4.3.7 *Sharpness MG*, em acum

As Figura 42, Figura 43 e Figura 44 representam os valores de *Sharpness* calculados segundo o modelo de Moore, Glasberg e Baer, em acum, para diferentes patologias e pavimentos, em função das degradações. Este indicador revela uma tendência de aumento às velocidades mais baixas, sendo que a 65 km/h mantém-se sensivelmente igual ao mesmo com valores inferiores. Este indicador assim como *Sharpness CF*, apresenta uma evolução mais explícita em paralelo com a velocidade, sendo os valores mais elevados associados a velocidades mais altas. O valor máximo e mínimo de *Sharpness* é 5.34 acum e 3.29 acum, sendo ambos os valores correspondentes ao pavimento em MBB sem qualquer tipo de degradação às velocidades de 65 e 30 km/h, respetivamente. Os valores de *Sharpness* mais elevados estão associados, essencialmente, ao pavimento em BB, assim como no *Sharpness CF*, no entanto a escala de valores do *Sharpness MG* é maior.

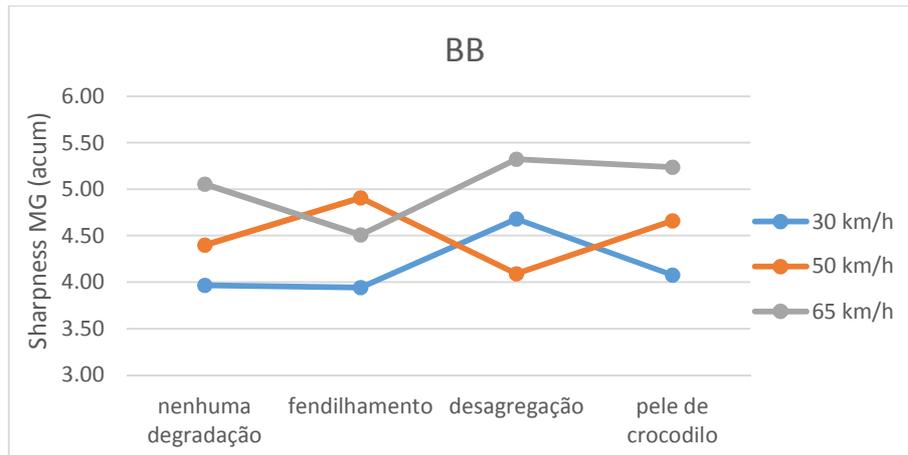


Figura 42 – *Sharpness MG* do pavimento em BB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

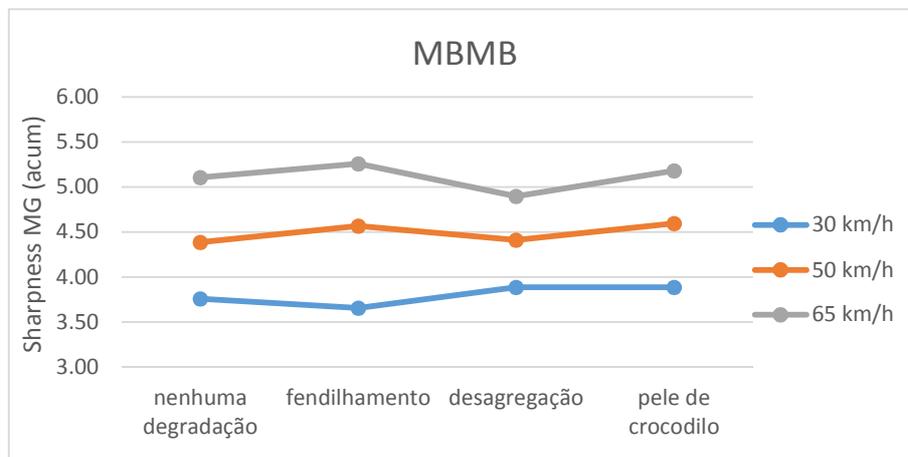


Figura 43 – *Sharpness MG* do pavimento em MBMB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

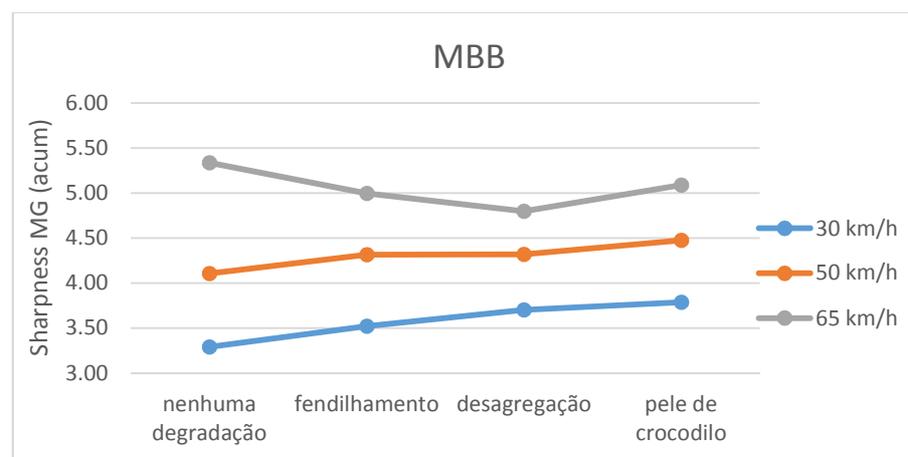


Figura 44 – *Sharpness MG* do pavimento em MBB em função das degradações para os 3 níveis de velocidade

### **4.3.8 Avaliação geral**

De um modo geral, todos os indicadores apresentam uma evolução em função da velocidade, à exceção do indicador psicoacústico *Roughness*. Neste os valores mais altos estão associados a velocidades mais reduzidas. Para os indicadores nível de pressão sonora, com e sem ponderação A, *Loudness* e *Roughness* os pavimentos em MBB e MBMB são os que apresentam valores superiores. Para o nível de pressão sonora máximo os valores mais altos estão associados a pavimentos em BB e MBB. Para o indicador Sharpness o que apresenta valores superiores, nos dois modelos, é o pavimento em BB.

## **4.4 Avaliação do efeito das degradações nos indicadores acústicos em função da velocidade**

Um dos principais objetivos deste estudo é avaliação do impacto das degradações no ruído pneu-pavimento, para tal optou-se por uma avaliação apoiada na análise gráfica de cada indicador, em função da velocidade, separada de acordo com as degradações existentes. Para uma análise correta é necessário comparar os níveis de pressão sonora num mesmo pavimento, com a mesma velocidade, sem degradação e com a degradação que se pretende analisar.

### **4.4.1 Nível de pressão sonora equivalente, em dB**

A Figura 45 representa os níveis de pressão sonora, em dB, sem a ponderação do filtro A, para diferentes patologias, em função da velocidade.

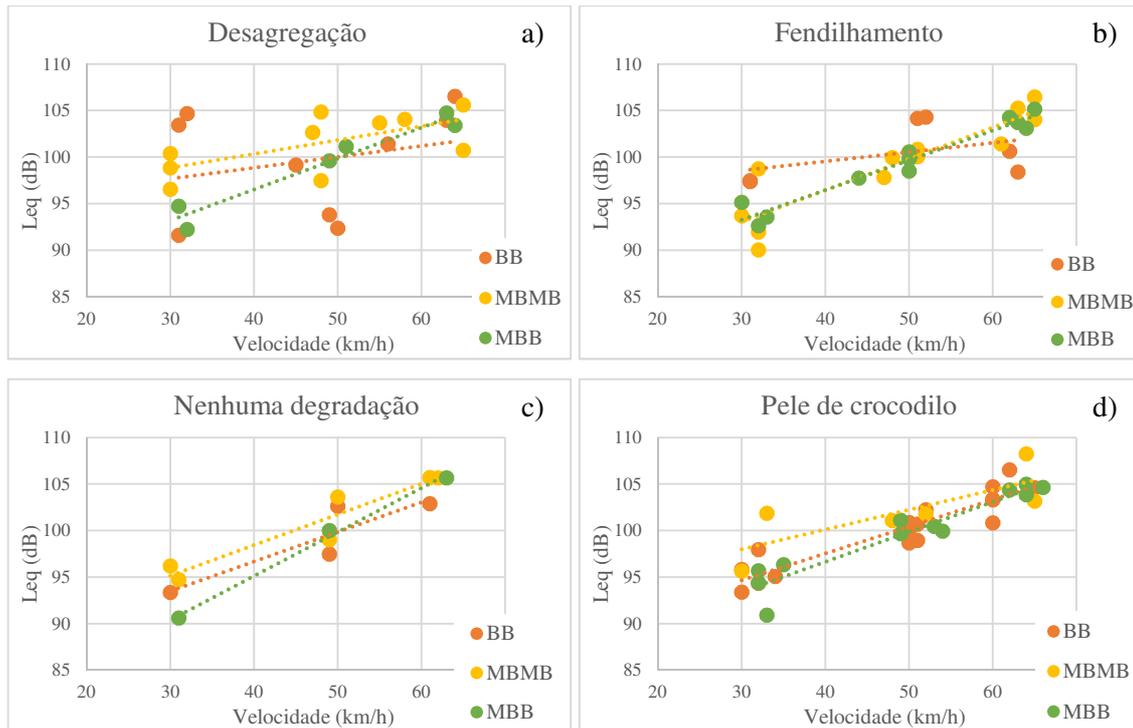


Figura 45 – Nível de pressão sonora (dB) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Para a velocidade de 30 km/h o valor máximo de nível de pressão sonora sem qualquer tipo de degradação é 93.34 dB, 96.19 dB e 90.60 dB para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. No que diz respeito à desagregação a 30 km/h apresenta-se como valor máximo 104.67 dB para o pavimento em BB, 100.38 dB para o pavimento em MBMB e 94.72 dB para o pavimento em MBB. Deste modo, pode-se demonstrar claramente o aumento do nível de pressão sonora, em dB, em função da patologia, desagregação. Esse aumento é mais visível em pavimentos com BB, apresentando uma variação do nível de pressão sonora de 11.33 dB, enquanto que nos pavimento em MBMB e MBB essa variação é de 4.19 dB e 4.12 dB, respetivamente. No caso fendilhamento a 30 km/h identifica-se como valor máximo, de nível de pressão sonora, 97.46 dB para o pavimento com BB, 98.74 dB para MBMB e 95.13 dB para MBB. Assim sendo, os níveis de pressão sonora também são mais elevados com a patologia fendilhamento do que sem degradações, apresentando variações de 4.12 dB, 2.55 dB e 4.53 dB para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para os pavimentos com pele de crocodilo os valores máximos do nível de pressão sonora são 97.93 dB, 101.88 dB e 96.35 dB para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Logo, os níveis de pressão sonora também se apresentam superiores quando o pavimento expõe pele de crocodilo, sendo as variações de 4.59 dB para o

pavimento em BB, 5.69 dB para MBMB e 5.75 para MBB. Deste modo, para velocidades de 30 km/h existe uma influência clara do tipo de degradação que o pavimento apresenta, sendo os pavimentos com desagregação e pele de crocodilo os que mais influenciam os níveis de pressão sonora em dB.

Para a velocidade de 50 km/h, nos pavimentos sem degradações em BB e MBMB apresentam dois valores muito distintos, sendo os valores máximos demasiado elevados para pavimentos sem degradações. Sendo assim considera-se o nível de pressão sonora é 97.46 dB, 99.02 dB e 100.02 dB, para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Neste caso, os níveis de pressão sonora mais elevados estão associados a desagregação e pele de crocodilo. A diferença entre o pavimento sem degradações e o pavimento em BB com fendilhamento é o que apresenta uma maior disparidade, sendo essa diferença de 6.85 dB. Após uma comparação de pavimentos sem degradação com as distintas patologias podemos constatar que para a velocidade de 50 km/h, assim como a 30 km/h, os níveis de pressão sonora são superiores em pavimentos com degradações do que sem degradações, no entanto os pavimentos com fendilhamento e pele de crocodilo são os que mais influenciam esses níveis de pressão sonora para 50 km/h.

Para a velocidade de 65 km/h o valor máximo de nível de pressão sonora sem qualquer tipo de degradação é 102.89 dB, 105.71 dB e 105.66 dB para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para esta velocidade as diferenças entre os níveis de pressão sonora dos pavimentos sem degradações, com as distintas patologias não apresenta uma influência tão significativa como às velocidades de 30 e 50 km/h. Apesar das diferenças não serem tão consideráveis o pavimento em BB com desagregação e pele de crocodilo apresenta uma diferença de 3.65 dB entre os níveis de pressão sonora sem degradação e com as patologias.

De forma geral, o nível de pressão sonora, em dB, apresenta um aumento claro, essencialmente a 30 km/h, entre os pavimentos sem qualquer tipo de degradação e com as respetivas patologias, sendo as que têm maior influência a desagregação e a pele de crocodilo.

#### 4.4.2 Nível de pressão sonora equivalente, em dB(A)

A Figura 46 representa os níveis de pressão sonora, em dB(A), com a ponderação do filtro A, para diferentes patologias, em função da velocidade.

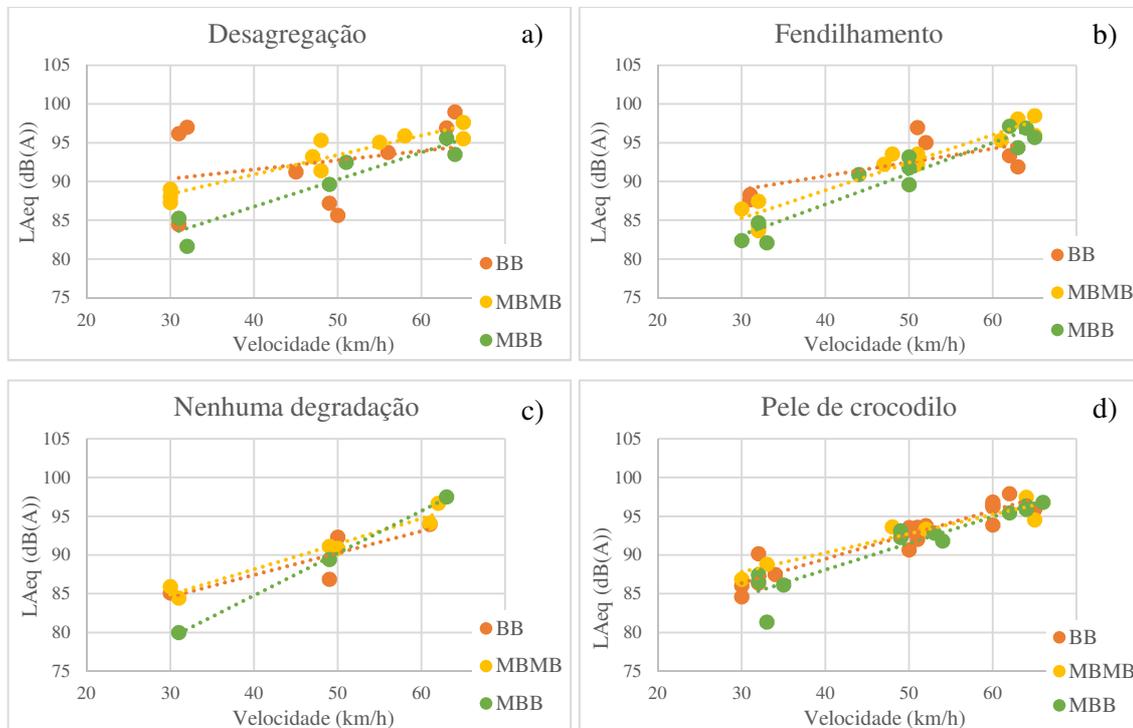


Figura 46 – Nível de pressão sonora (dB(A)) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Para a velocidade de 30 km/h o valor máximo de nível de pressão sonora sem qualquer tipo de degradação é 85.1 dB(A), 85.91 dB(A) e 80.01 dB(A) para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. No que diz respeito à desagregação a 30 km/h apresenta-se como valor máximo 97.02 dB(A) para o pavimento em BB, 89.01 dB(A) para o pavimento em MBMB e 85.28 dB(A) para o pavimento em MBB. Deste modo, pode-se constatar um claro aumento do nível de pressão sonora, em dB(A), em função da patologia, desagregação. Esse aumento é mais visível em pavimentos com BB, apresentando uma variação do nível de pressão sonora de 11.92 dB(A), enquanto que nos pavimento em MBMB e MBB essa variação é de 3.1 dB(A) e 5.27 dB(A), respetivamente. No caso do fendilhamento a 30 km/h, foram registados como níveis de pressão sonora, 88.32 dB(A) para o pavimento com BB, 87.46 dB(A) para MBMB e 84.68 dB(A) para MBB. Assim sendo, os níveis de pressão sonora também são mais elevados com a patologia fendilhamento do que sem patologia,

apresentando variações de 3.22 dB(A), 1.55 dB(A) e 4.67 dB(A) para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para os pavimentos com pele de crocodilo os valores máximos do nível de pressão sonora são 90.18 dB(A), 88.83 dB(A) e 87.45 dB(A) para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Logo, os níveis de pressão sonora também são superiores quando o pavimento apresenta pele de crocodilo, sendo as variações de 5.08 dB(A) para o pavimento em BB, 2.92 dB(A) para MBMB e 7.44 dB(A) para MBB. Deste modo, para velocidades de 30 km/h existe uma influência significativa do tipo de degradação que o pavimento apresenta, sendo os pavimentos com desagregação e pele de crocodilo os que mais influenciam os níveis de pressão sonora em dB(A).

Para a velocidade de 50 km/h, os pavimentos sem degradações apresentam dois valores muito distintos, sendo os valores máximos demasiado elevados para pavimentos sem degradações. Sendo assim considera-se o nível de pressão sonora é 86.87 dB(A), 91.11 dB(A) e 89.44 dB(A), para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Neste caso, os níveis de pressão sonora mais elevados estão associados a fendilhamento e pele de crocodilo. A diferença entre o pavimento sem degradações e o pavimento em BB com fendilhamento é o que apresenta uma maior disparidade, sendo essa diferença de 10.08 dB(A). Após uma comparação de pavimentos sem degradação com as distintas patologias constata-se que para a velocidade de 50 km/h, assim como a 30 km/h, os níveis de pressão sonora são superiores em pavimentos com degradações relativamente ao estado sem degradações, no entanto os pavimentos com fendilhamento e pele de crocodilo são os que mais influenciam esses níveis de pressão sonora para 50 km/h.

Para a velocidade de 65 km/h o valor máximo de nível de pressão sonora sem qualquer tipo de degradação é 93.97 dB(A), 96.68 dB(A) e 97.5 dB(A) para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para esta velocidade as diferenças entre os níveis de pressão sonora dos pavimentos sem degradações, com as distintas patologias não apresenta uma influência tão significativa como às velocidades de 30 e 50 km/h. Apesar das diferenças não serem tão consideráveis, no pavimento em BB com desagregação e pele de crocodilo, apresenta-se uma diferença de 5.01 dB(A) e 3.94 dB(A), respetivamente, entre os níveis de pressão sonora sem degradação e com as patologias.

De forma geral, o nível de pressão sonora, em dB(A), apresenta um aumento significativo, essencialmente a 30 km/h, entre os pavimentos sem qualquer tipo de degradação e com as

respetivas patologias, sendo as que tem maior influência a desagregação e a pele de crocodilo.

#### 4.4.3 Nível de pressão sonora máximo, em dB(A)

A Figura 47 representa os níveis de pressão sonora máximos, em dB(A), com a ponderação do filtro A, para diferentes patologias, em função da velocidade.

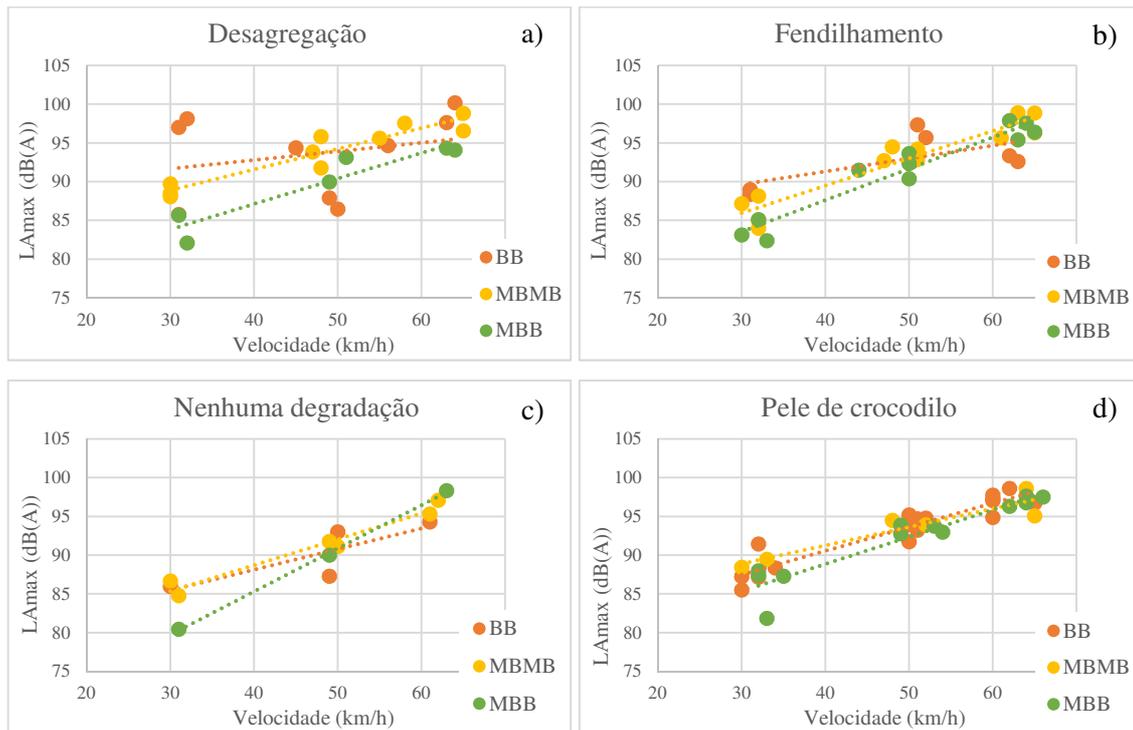


Figura 47 – Nível de pressão máxima (dB(A)) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Para a velocidade de 30 km/h os valores de níveis de pressão sonora máximos sem qualquer tipo de degradação é 85.96 dB(A), 86.65 dB(A) e 80.45 dB(A) para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. No que diz respeito à desagregação a 30 km/h apresenta-se como valor máximo 98.12 dB(A) para o pavimento em BB, 89.71 dB(A) para o pavimento em MBMB e 85.68 dB(A) para o pavimento em MBB. Deste modo, constata-se que há um aumento do nível de pressão sonora máximo, em dB(A), em função da patologia, desagregação. Esse aumento é mais visível em pavimentos com BB, apresentando uma variação do nível de pressão sonora máximo de 12.16 dB(A), enquanto que nos pavimento em MBMB e MBB essa variação é de 3.06 dB(A) e 5.23 dB(A), respetivamente. No caso do fendilhamento a 30 km/h apresenta-se com valores de nível de pressão sonora máximo, 88.97

dB(A) para o pavimento com BB, 88.16 dB(A) para MBMB e 85.12 dB(A) para MBB. Assim sendo, os níveis de pressão sonora máximos também são mais elevados com a patologia fendilhamento do que sem degradações, apresentando variações de 3.01 dB(A), 1.51 dB(A) e 4.67 dB(A) para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para os pavimentos com pele de crocodilo os valores do nível de pressão sonora máximos são 91.46 dB(A), 89.45 dB(A) e 87.97 dB(A) para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Logo, os níveis de pressão sonora máximos também são superiores quando o pavimento apresenta pele de crocodilo, do que quando está sem degradações, sendo essas variações de 5.5 dB(A) para o pavimento em BB, 2.8 dB(A) para MBMB e 7.52 dB(A) para MBB. Deste modo, para velocidades de 30 km/h existe uma influência clara do tipo de degradação que o pavimento apresenta, sendo os pavimentos com desagregação e pele de crocodilo os que mais influenciam os níveis de pressão sonora máximos, em dB(A).

Para a velocidade de 50 km/h os níveis de pressão sonora máximos a considerar para os pavimentos sem degradações é 93.01 dB(A), 91.77 dB(A) e 90.02 dB(A), para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Neste caso, os níveis de pressão sonora máximos mais elevados estão associados a desagregação e fendilhamento. A diferença entre o pavimento sem degradações e o pavimento em BB com fendilhamento é o que apresenta uma maior diferença, de 4.34 dB(A). Após uma comparação de pavimentos sem degradação com as distintas patologias constata-se que para a velocidade de 50 km/h, assim como a 30 km/h, os níveis de pressão sonora máximos são superiores em pavimentos com degradações do que sem degradações. No entanto, os pavimentos com desagregação, fendilhamento e pele de crocodilo influenciam os níveis de pressão sonora máximos para 50 km/h de forma semelhante, isto é, as diferenças entre os pavimentos são próximas.

Para a velocidade de 65 km/h o valor de nível de pressão sonora máxima sem qualquer tipo de degradação é 94.29 dB(A), 97.09 dB(A) e 98.31 dB(A) para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para esta velocidade as diferenças entre os níveis de pressão sonora dos pavimentos sem degradações, com as distintas patologias não apresenta uma influência tão significativa como às velocidades de 30 e 50 km/h. Apesar das diferenças não serem tão consideráveis o pavimento em BB com desagregação e pele de crocodilo apresenta uma diferença de 5.89 dB(A) e 4.32 dB(A), respetivamente, entre os níveis de pressão sonora sem degradação e com as patologias.

De forma geral, o nível de pressão sonora máximo, em dB(A), apresenta um aumento significativo, essencialmente a 30 km/h, entre os pavimentos sem qualquer tipo de degradação e com as respetivas patologias, sendo as que tem maior influência a desagregação e a pele de crocodilo.

## **4.5 Avaliação do efeito das degradações nos indicadores psicoacústicos em função da velocidade**

### **4.5.1 Loudness, em Sone**

A Figura 48 representa o *Loudness*, em Sone, para diferentes patologias, em função da velocidade.

Para a velocidade de 30 km/h os valores máximos de *Loudness* sem qualquer tipo de degradação são 50.82 Sones, 52.5 Sones e 37.15 Sones para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. No que diz respeito à desagregação a 30 km/h apresenta-se como valor máximo 94.9 Sones para o pavimento em BB, 62.5 Sones para o pavimento em MBMB e 51.74 Sones para o pavimento em MBB. Deste modo, confirma-se claramente o aumento dos valores de *Loudness* em função da patologia, desagregação. Esse aumento é mais visível em pavimentos com BB, apresentando uma variação de 44.08 Sones, enquanto que nos pavimentos em MBMB e MBB essa variação é de 10 Sones e 14.24 Sones, respetivamente. No caso fendilhamento a 30 km/h os valores máximos de *Loudness* são, 58.36 Sones para o pavimento com BB, 54.56 Sones para MBMB e 47.35 Sones para MBB. Assim sendo, os valores de *Loudness* também são mais elevados com a patologia fendilhamento do que sem degradações, apresentando variações de 7.54 Sones, 2.06 Sones e 10.2 Sones para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para os pavimentos com pele de crocodilo os valores máximos de *Loudness* são 63.18 Sones, 60.88 Sones e 56.62 Sones para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Logo, o *Loudness* também é superior quando o pavimento apresenta pele de crocodilo, do que quando está sem degradações, sendo essas variações de 12.36 Sones para o pavimento em BB, 8.38 Sones para MBMB e 19.47 Sones para MBB.

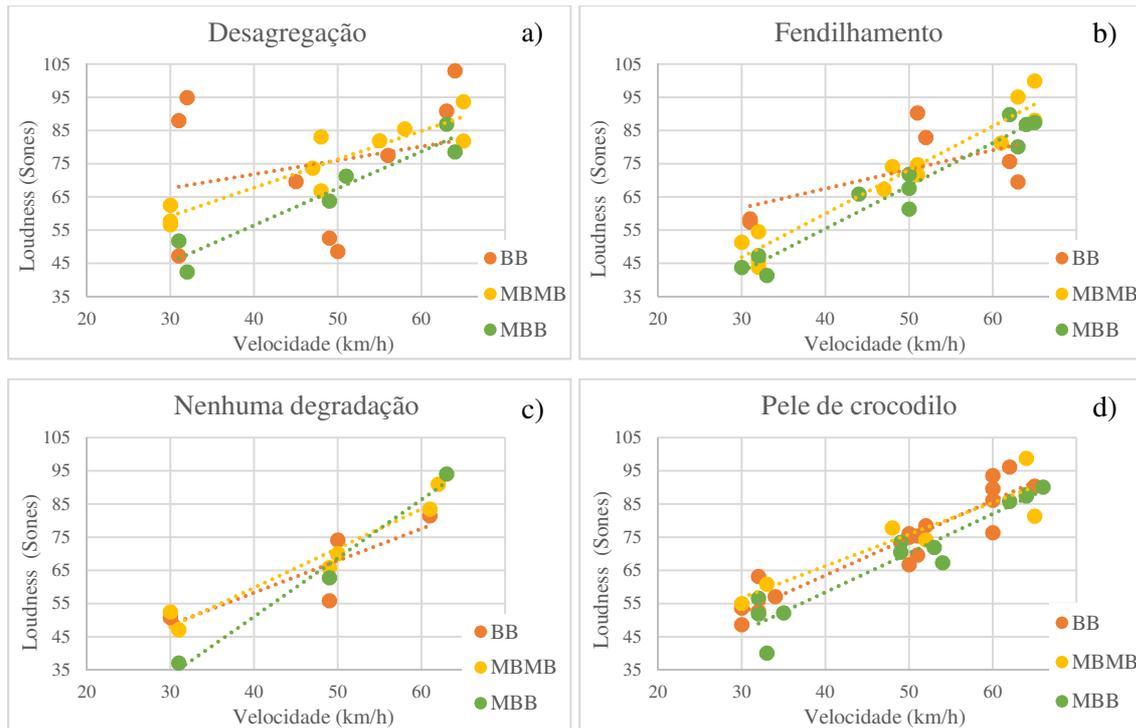


Figura 48 – *Loudness* (Sones) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Para a velocidade de 50 km/h os valores de *Loudness* a considerar para os pavimentos sem degradações é 74.15 Sones, 69.99 Sones e 62.77 Sones, para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Neste caso, os valores mais elevados de *Loudness* estão associados ao fendilhamento. A diferença, neste indicador, para o pavimento sem degradações e o pavimento em BB com fendilhamento é a maior sendo de 16.11 Sones. Constatou-se, que para a velocidade de 50 km/h, assim como a 30 km/h, existe influência acentuada das patologias nos valores do *Loudness*. No entanto, os pavimentos com desagregação, fendilhamento e pele de crocodilo influenciam de forma semelhante o *Loudness*, isto é, as diferenças entre os valores de *Loudness* dos pavimentos sem desagregação com os pavimentos com patologias variam da mesma forma.

Para a velocidade de 65 km/h os valores de *Loudness* sem qualquer tipo de degradação são 81.41 Sones, 90.93 Sones e 94.06 Sones para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para esta velocidade as diferenças entre os pavimentos sem degradações, com as distintas patologias é menos óbvia. Isto é, apesar de alguns pavimentos apresentarem diferenças de *Loudness* significativas, em outros tipos de pavimentos as diferenças são menores ou mesmo nulas. Sendo assim, os pavimentos em BB e MBMB, com desagregação

e pele de crocodilo, são os que apresentam uma maior diferença nos valores de *Loudness*. Essas diferenças, para o pavimento em BB são, 21.56 Sones para desagregação e 14.72 Sones para pele de crocodilo, para o pavimento em MBMB são, 2.72 Sones para desagregação e 7.83 Sones para pele de crocodilo.

De forma geral, o *Loudness*, em Sones, apresenta um aumento significativo, essencialmente a 30 km/h, entre os pavimentos sem qualquer tipo de degradação e com as respetivas patologias, sendo as que tem maior influência a desagregação e a pele de crocodilo. Existe uma clara evolução dos valores deste indicador em função da velocidade, sendo este menos significativo nos pavimentos em BB.

#### **4.5.2 *Roughness*, em aspers**

A Figura 49 representa o *Roughness*, em aspers, para diferentes patologias, em função da velocidade.

Para a velocidade de 30 km/h os valores máximos de *Roughness* sem qualquer tipo de degradação são 0.11 aspers, 0.25 aspers e 0.19 aspers para os pavimentos de BB, MBMB e MBB, respetivamente. No entanto, para o pavimento em MBMB o valor máximo é muito elevado, logo considera-se 0.10 aspers. Para a desagregação apresenta-se como valores máximos de *Roughness*, 0.19 aspers para BB, 0.48 aspers para MBMB e 0.25 aspers para MBB. Sendo assim, verifica-se que a desagregação tem influência no indicador *Roughness*, sendo as diferenças, 0.08 aspers para BB, 0.23 aspers para MBMB e 0.06 aspers para MBB. No que diz respeito a fendilhamento, os valores máximos de *Roughness* são 0.20 aspers para BB, 0.35 aspers para MBMB e 0.27 aspers para MBB. Neste caso as diferenças são de 0.09 aspers, 0.25 aspers e 0.08 aspers, para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Logo, constata-se que, como na desagregação, o *Roughness* é influenciado pelo fendilhamento, essencialmente em pavimentos em MBMB. Para a pele de crocodilo registaram-se valores máximos de *Roughness*, 0.35 aspers, 0.20 aspers e 0.38 aspers, para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Pode-se verificar que, como nas outras degradações, o *Roughness* é influenciado pela pele de crocodilo, apresentando como diferenças 0.24 aspers para BB, 0.1 aspers para MBMB e 0.19 aspers para MBB. Este tipo de degradação o pavimento em BB é o que apresenta a diferença mais elevada.

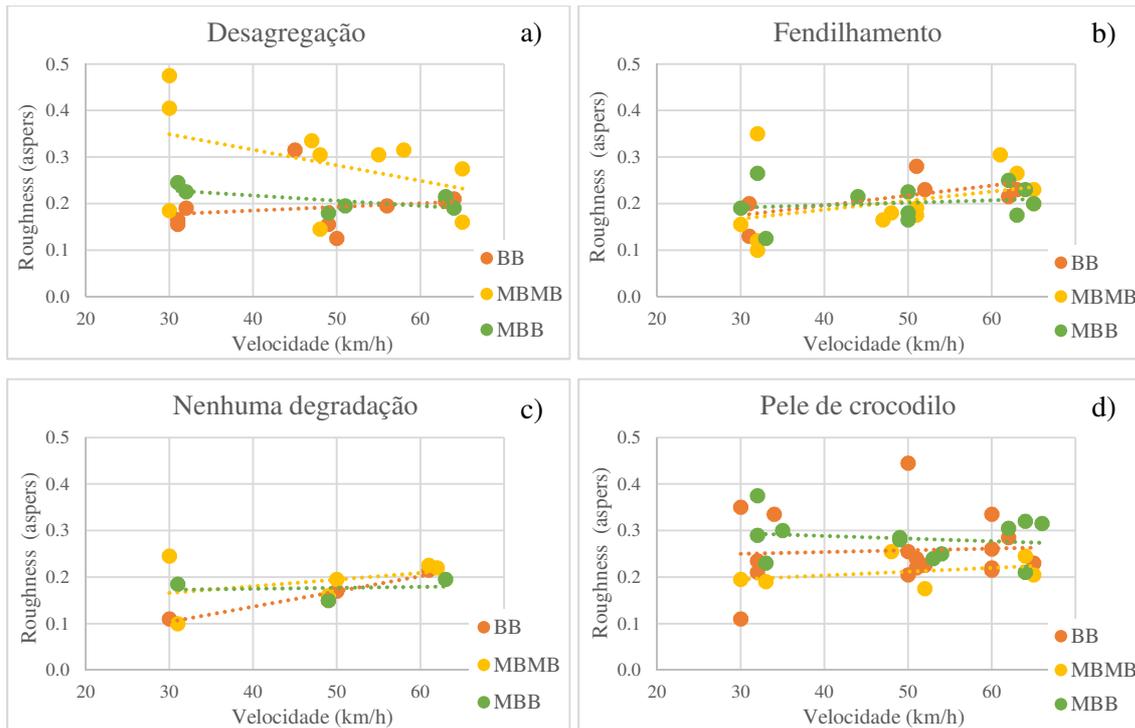


Figura 49 – *Roughness* (aspers) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Para a velocidade de 50 km/h os valores de *Roughness* a considerar para os pavimentos sem degradações são 0.17 aspers, 0.20 aspers e 0.15 aspers, para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Neste caso, os valores mais elevados de *Roughness* estão associados a pele de crocodilo. A patologia pele de crocodilo é a que conduz a uma maior diferença, de 0.28 aspers. Para a velocidade de 50 km/h, assim como a 30 km/h, constata-se que existe influência acentuada das patologias nos valores do *Roughness*.

Para a velocidade de 65 km/h os valores de *Roughness* sem qualquer tipo de degradação são 0.22 aspers, 0.23 aspers e 0.20 aspers para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para esta velocidade as diferenças entre os pavimentos sem degradações, com as distintas patologias não é tão aparente, isto é, apesar de para alguns pavimentos apresentarem diferenças de *Roughness* significativas em outros tipos de pavimentos as patologias apresentam uma influência menor ou até mesmo nula. Sendo assim, os pavimentos em BB e MBB, com pele de crocodilo, são os que apresentam uma maior diferença nos valores de *Roughness*, de 0.12 aspers.

De forma geral, existe um aumento dos valores *Roughness* em pavimentos com degradações em comparação com pavimentos sem degradações. Esse aumento é mais acentuado no pavimento em MBMB à velocidade de 30 km/h. Para este indicador não existe evolução dos valores de *Roughness* em função da velocidade.

#### 4.5.3 *Sharpness CF*, em acum

A Figura 50 representa os valores de *Sharpness* calculados segundo o modelo de Chalupper e Fastl, em acum, para diferentes patologias, em função da velocidade.

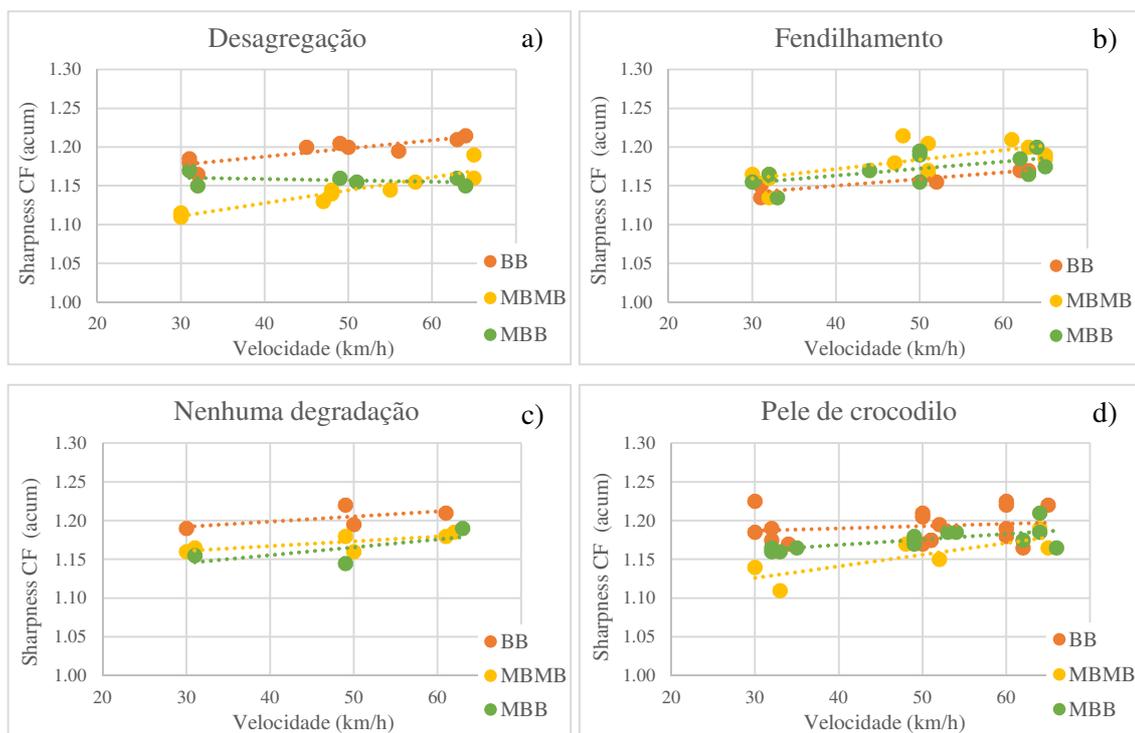


Figura 50 – *Sharpness CF* (acum) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Após uma análise dos seguintes gráficos constata-se que a variação deste indicador não é muito significativa. Sendo que o máximo valor registado é 1.23 acum, e corresponde a um pavimento em BB com pele de crocodilo, e valor mínimo é 1.11 acum, e corresponde a um pavimento em MBMB com desagregação, a diferença entre estes valores é reduzida. No entanto, pode-se observar um ligeiro aumento nos valores de *Sharpness* dos pavimentos com degradações em comparação com os mesmos pavimentos sem degradações. No entanto, a

maior diferença é de apenas 0.05 acum e corresponde a um pavimento em MBB com fendilhamento.

#### 4.5.4 Sharpness MG, em acum

A Figura 51 representa os valores de *Sharpness* calculados segundo o modelo de Moore, Glasberg e Baer, em acum, para diferentes patologias, em função da velocidade.

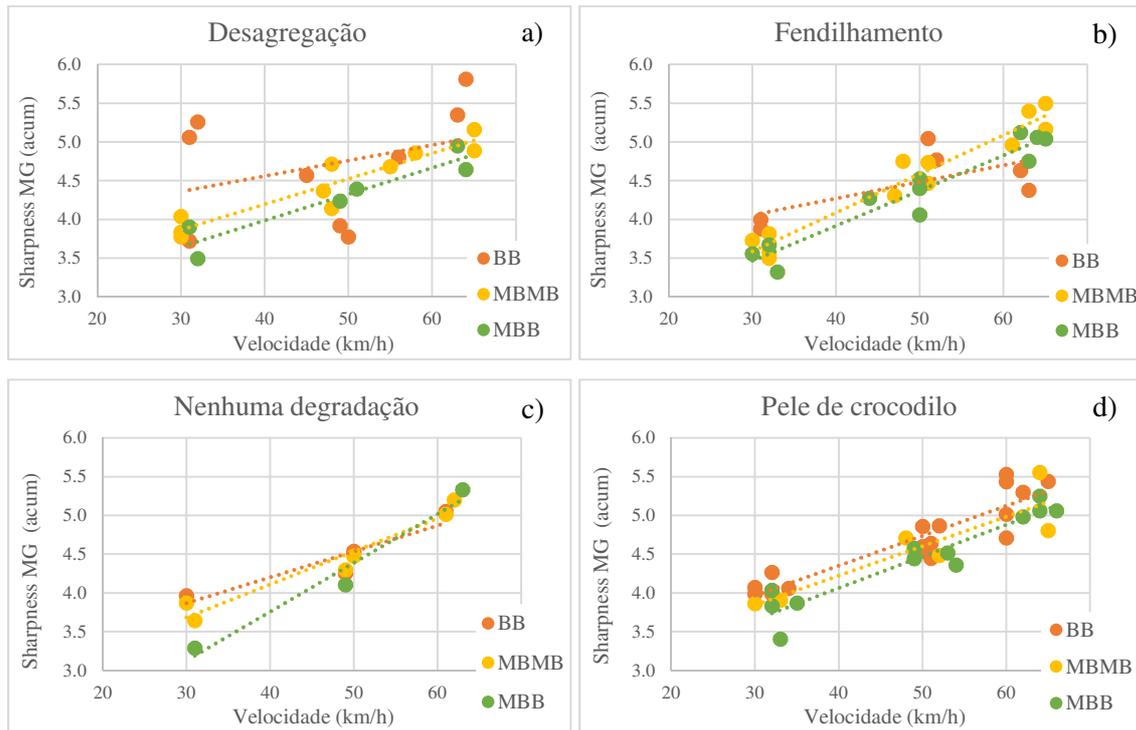


Figura 51 – *Sharpness MG* (acum) em função da velocidade, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Este modelo para o cálculo do *Sharpness* já permite uma melhor avaliação deste indicador em função das patologias. Para a velocidade de 30 km/h os valores máximos de *Sharpness* sem qualquer tipo de degradação são 3.97 acum, 3.87 acum e 3.29 acum para os pavimentos de BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para a desagregação observa-se como valores máximos de *Sharpness*, 5.26 acum para BB, 4.04 acum para MBMB e 3.91 acum para MBB. Sendo assim, a influência das degradações no indicador *Sharpness*, traduz-se em diferenças de, 1.29 acum para BB, 0.17 acum para MBMB e 0.62 acum para MBB. No que diz respeito a fendilhamento, apresenta-se com valores máximos de *Sharpness*, 4 acum para BB, 3.82 acum para MBMB e 3.68 para MBB. Neste caso, as diferenças são 0.03 acum, -0.05 acum e

0.39 acum, para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Logo, pode-se constatar que o *Sharpness* não é muito influenciado pelo fendilhamento, sendo que no pavimento em MBMB não apresenta nenhuma influência. Para a pele de crocodilo apresentam-se como valores máximos de *Sharpness*, 4.27 acum, 3.91 acum e 4.04 acum, para os pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Pode-se verificar que, como na desagregação, o *Sharpness* é influenciado pela pele de crocodilo, apresentando diferenças de 0.3 acum para BB, 0.04 acum para MBMB e 0.75 acum para MBB. Para este indicador pode reconhecer-se que a influência das degradações não é tão significativa no pavimento em MBMB. As degradações que mais influenciam o indicador *Sharpness*, a 30km/h, são a desagregação e a pele de crocodilo.

Para a velocidade de 50 km/h os valores de *Sharpness* a considerar para os pavimentos sem degradações são 4.54 acum, 4.48 acum e 4.11 acum, para pavimentos em BB, MBMB e MBB, respetivamente. Neste caso, os valores mais elevados de *Sharpness* estão associados a fendilhamento e pele de crocodilo. A diferença *Sharpness* entre o pavimento sem degradações e o pavimento em BB com fendilhamento é a maior, sendo de 0.51 acum. Com base na comparação do *Sharpness* do pavimentos sem degradação com as distintas patologias constata-se, que para a velocidade de 50 km/h existe influência mais reduzida das patologias nos valores do *Sharpness*, do que a 30 km/h.

Para a velocidade de 65 km/h os valores de *Sharpness* sem qualquer tipo de degradação são 5.06 acum, 5.20 acum e 5.34 acum, para os pavimentos com BB, MBMB e MBB, respetivamente. Para esta velocidade, neste indicador, as diferenças entre os pavimentos sem degradações, com as várias patologias é menos notória. Sendo assim, o pavimento em BB com desagregação e pele de crocodilo, são os que apresentam uma maior diferença nos valores de *Sharpness*, de 0.75 acum e 0.47 acum, respetivamente.

De forma geral, existe um aumento dos valores *Sharpness* em pavimentos com degradações em comparação com pavimentos sem degradações. Esse aumento é mais acentuado nos pavimentos em BB e MBB, a velocidades mais reduzidas. Para este indicador existe uma clara evolução em função da velocidade.

## 4.6 Avaliação do efeito das degradações em função da textura

### 4.6.1 Indicadores acústicos

A Figura 52 representa os três indicadores acústicos estudados, o nível de pressão sonora equivalente com e sem ponderação A (dB e dB(A)) e o nível de pressão sonora máximo (dB(A)) em função da profundidade média do perfil (MPD) para as distintas patologias, agrupando os diferentes tipos de pavimentos.

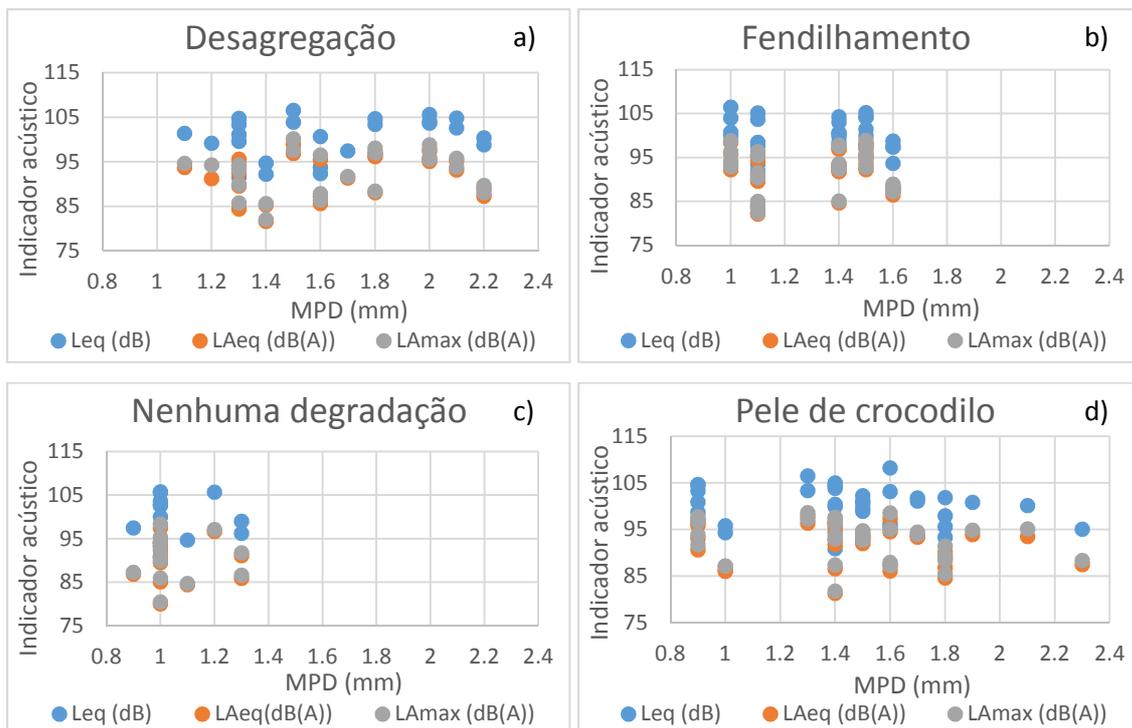


Figura 52 – Indicadores acústicos em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

Após a análise gráfica pode-se constatar que para mesmos níveis de pressão sonora, comparando os pavimentos sem nenhum tipo de degradação com as distintas patologias, existe um significativo aumento da textura, ou seja, da profundidade média. Os pavimentos com pele de crocodilo e desagregação são os que apresentam maiores valores de profundidade média, ou seja, são os que mais influenciam a textura em comparação com os pavimentos sem degradação. Os pavimentos com fendilhamento apresentam menores valores em comparação com as outras patologias, no entanto, apresentam maiores valores de profundidade média em comparação com os pavimentos sem degradações.

### 4.6.2 Indicadores psicoacústicos

A Figura 53 representa o indicador psicoacústico *Loudness* (Sones) em função da profundidade média do perfil (MPD) para as várias patologias.

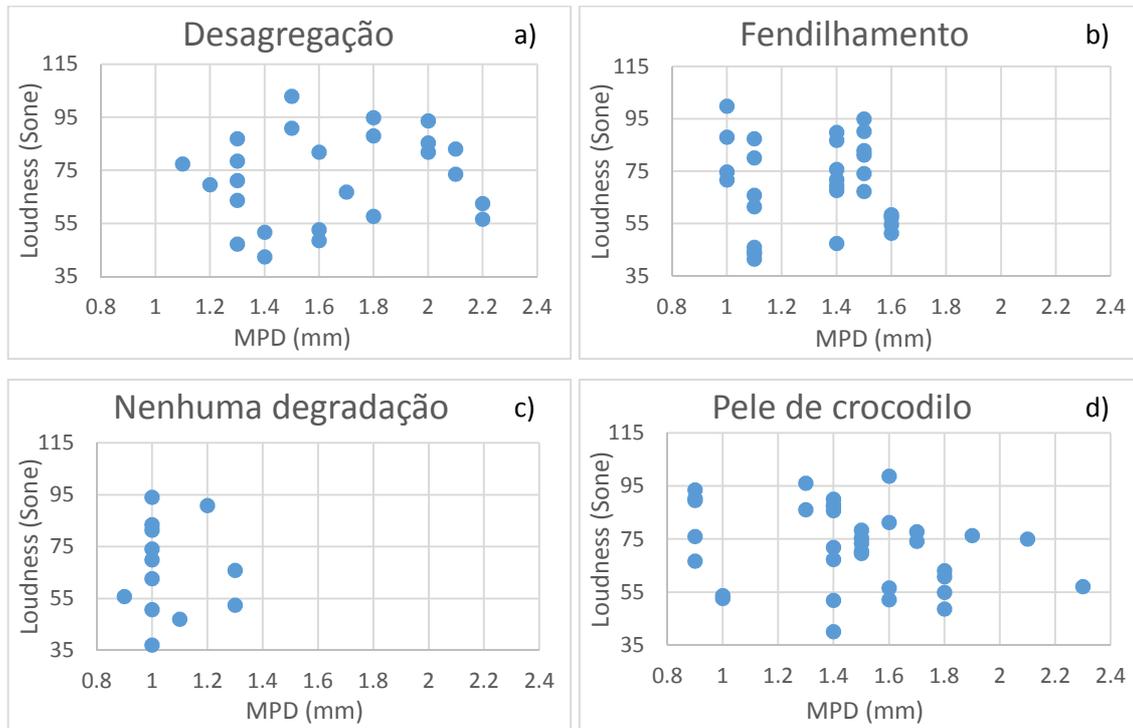


Figura 53 – Loudness em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

As Figura 54 representam o indicador psicoacústico *Sharpness* (acum) em função da profundidade média do perfil (MPD) para as várias patologias. Os valores de *Sharpness CF*, calculados segundo o modelo de Chalupper e Fastl, não apresentam valores com variações significativas, sendo o modelo de Moore, Glasberg e Baer, *Sharpness MG*, o que apresenta melhores resultados.

Os indicadores *Loudness* e *Sharpness* não alteram os seus valores com o aumento do MPD. Contudo, como é esperado, os pavimentos com pele de crocodilo e desagregação são os que apresentam maiores valores de profundidade média em comparação com os pavimentos sem degradação. Os pavimentos com fendilhamento apresentam menores valores em comparação

com as outras patologias, no entanto, apresentam maiores valores de profundidade média em comparação com os pavimentos sem degradações.

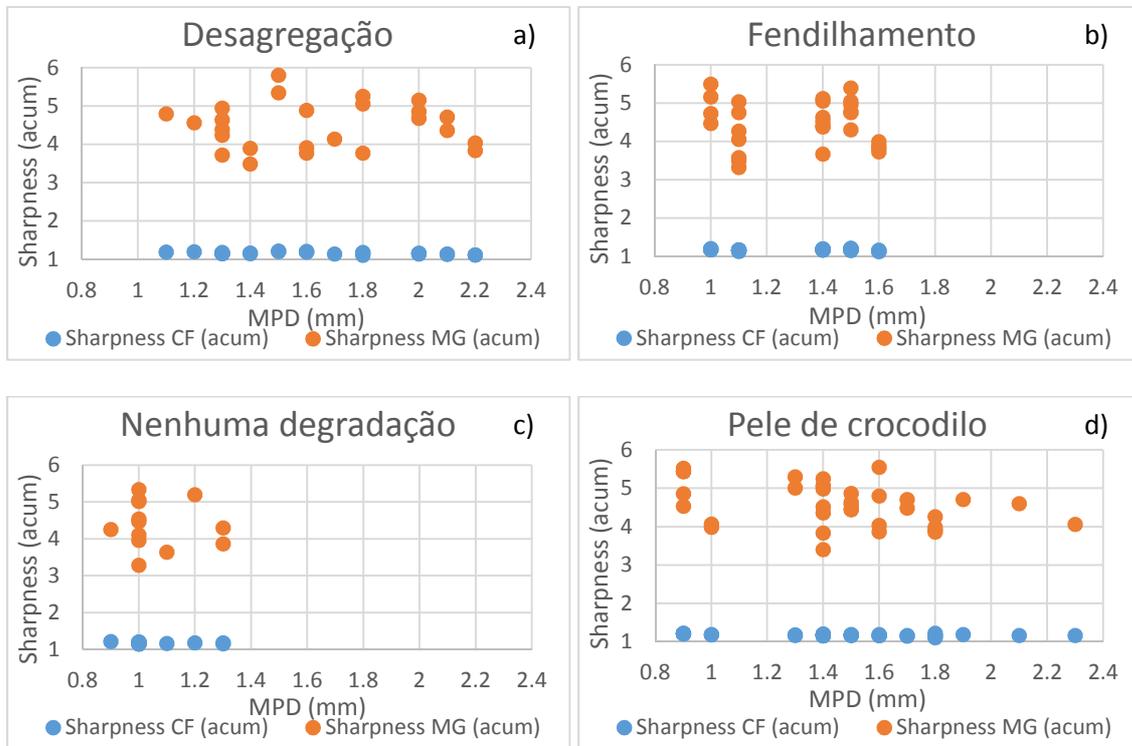


Figura 54 – Sharpness em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

A Figura 55 representa o indicador psicoacústico *Roughness* (aspers) em função da profundidade média do perfil (MPD) para as distintas patologias.

No que diz respeito ao *Roughness*, pode-se constatar que nos pavimentos sem degradações e nos pavimentos com fendilhamento existe uma tendência leve de aumento deste indicador com o aumento da profundidade média do perfil. Nos pavimentos com desagregação existe diminuição até valores de MPD de 1.8 mm e voltando posteriormente a aumentar, criando uma concavidade. Nos pavimentos com pele de crocodilo observa-se, de certa forma, um comportamento semelhante aos pavimentos com desagregação, diminuindo até valores de MPD de 1.8 mm e posteriormente apresenta valores mais elevados.

De um modo geral, a profundidade média do perfil tem alguma influência no indicador psicoacústico *Roughness* que parece ser não linear, contudo seria necessário uma maior gama de valores para estudar esta relação.

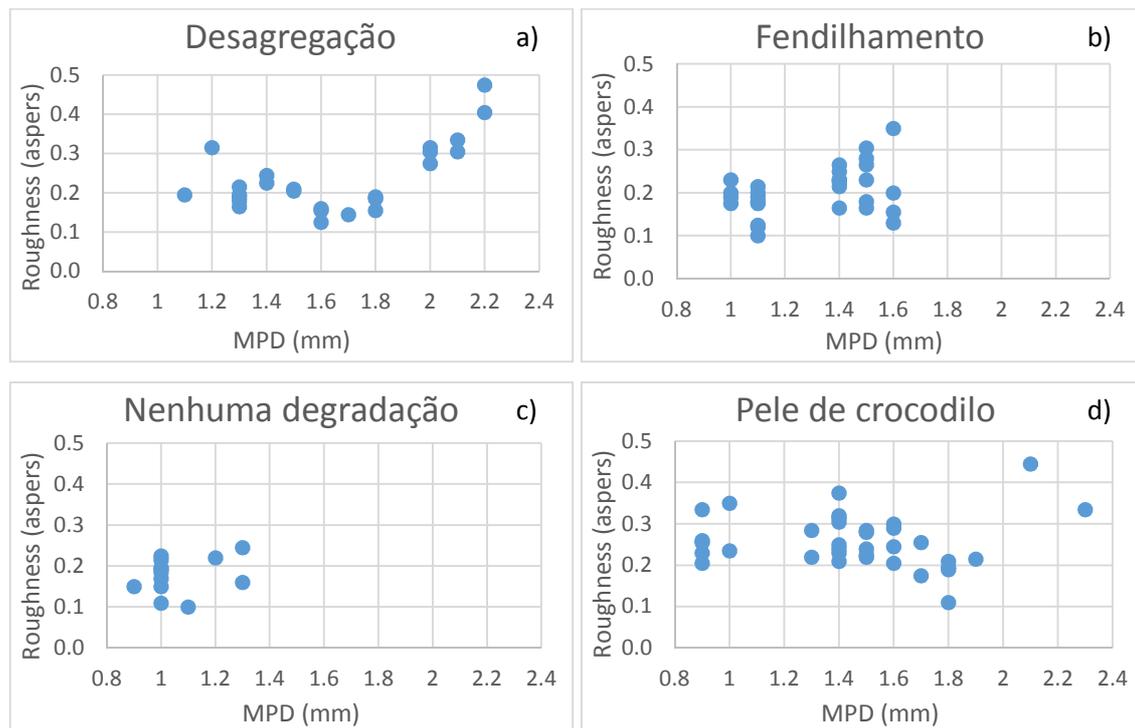


Figura 55 – Roughness em função do MPD, para: a) Desagregação; b) Fendilhamento; c) Nenhuma degradação; d) Pele de crocodilo

## 4.7 Modelação do ruído pneu-pavimento

### 4.7.1 Avaliação do desempenho das técnicas de DM

Para a modelação do ruído, como já foi referido, foram feitas 168 análises, fazendo variar a base de dados (todas as velocidades, 30, 50, 65 km/h), as variáveis de entrada (tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade) e as variáveis de saída (Leq, LAeq, LMax, Loudness, Roughness, Sharpness CF e Sharpness MG). De forma a simplificar a análise dos resultados, dividiu-se segundo as variáveis de entrada a considerar:

- 1ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, patologias, textura e velocidades
- 2ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a velocidade
- 3ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a textura
- 4ª Análise - variáveis de entrada: patologias, textura e velocidade
- 5ª Análise - variáveis de entrada: patologias e velocidade
- 6ª Análise - variáveis de entrada: velocidade

Inicialmente é necessário avaliar o desempenho de cada modelo de forma a escolher o modelo que apresenta o melhor desempenho, sendo o principal objetivo induzir um modelo que minimize a medição de erro entre os valores observados e previstos. Para tal, procedeu-se à avaliação das medidas baseadas no erro. Como exemplo, a Tabela 5, apresenta as medidas baseadas no erro e o coeficiente de correlação para as cinco técnicas utilizadas, para uma análise em que as variáveis de entrada são o tipo de pavimento, as patologias, a textura e a velocidade, considerando na base de dados todas as velocidades. Para a avaliação da melhor técnica o coeficiente de correlação deverá ser o mais próximo possível de 1 e as medidas baseadas no erro deverão apresentar os menores valores. No caso da Tabela 5 a técnica SVM é claramente a técnica que apresenta um melhor desempenho.

Tabela 5 – Medidas baseadas no erro e coeficiente de correlação para a 1ª análise considerando todas as velocidades para o indicador LAmax

	RT	KNN	MR	NN	SVM
COR	0.862	0.909	0.838	0.896	0.914
DAM	1.900	1.530	1.876	1.534	1.461
EAR	47.558	38.311	46.957	38.404	36.584
EQMR	2.429	1.991	2.604	2.199	1.942

Apesar de na Tabela 5 a escolha da técnica com melhor desempenho ser direta, existem casos em que essa seleção não é tão clara, nesses casos a avaliação das importâncias ajuda a efetuar a escolha da melhor técnica. Como é o caso da Tabela 6, respeitante ao indicador *Roughness*, em que a técnica RT apresenta um maior coeficiente de correlação (COR) e um menor erro quadrático médio relativo (EQMR), e a técnica SVM apresenta um menor desvio absoluto médio (DAM) e um menor erro absoluto relativo (EAR). A avaliação da correlação e das medidas baseadas no erro é notoriamente insuficiente. Para tal, avalia-se as importâncias relativas às duas técnicas, representadas na Tabela 7, para ver se algum dos parâmetros de entrada é considerado menos importante do que é esperado com base na experiência. Neste caso, como a técnica RT não atribui qualquer importância ao tipo de pavimento, logo opta-se pela técnica SVM.

Tabela 6 – Medidas baseadas no erro e coeficiente de correlação para a 1ª análise considerando todas as velocidades para indicador *Roughness*

	RT	KNN	MR	NN	SVM
COR	0.494	0.415	0.330	0.352	0.434
DAM	0.056	0.059	0.062	0.064	0.056
EAR	86.939	91.117	95.627	98.532	86.844
EQMR	0.077	0.081	0.083	0.095	0.080

Tabela 7 – Importâncias relativas à 1ª análise considerando todas as velocidades para indicador *Roughness*

Importâncias					
	RT	KNN	MR	NN	SVM
Tipo de pavimento	0.000%	20.43%	1.11%	2.54%	18.32%
Patologias	34.939%	20.16%	35.55%	8.52%	12.60%
Textura	57.849%	57.92%	60.11%	88.94%	51.89%
Velocidade	7.21%	1.50%	3.22%	0.00%	17.18%

Na Tabela 8 é apresentado o resumo das métricas obtidas nos melhores modelos para as seis análises, considerando na base de dados todas as velocidades. Na Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 são apresentados os resumos das métricas obtidas nos melhores modelos apenas para as quatro análises, pois na base de dados estão agrupadas as velocidades de 30, 50 e 65 km/h.

Tabela 8 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 6 análises com todas as velocidades como base de dados

	1ªAnálise	2ªAnálise	3ªAnálise	4ªAnálise	5ªAnálise	6ªAnálise
<b>Indicador</b>	<b>LAm<sub>ax</sub></b>	<b>LA<sub>eq</sub></b>	<b>Loudness</b>	<b>LA<sub>eq</sub></b>	<b>LAm<sub>ax</sub></b>	<b>LA<sub>eq</sub></b>
<b>Modelo</b>	<b>SVM</b>	<b>NN</b>	<b>NN</b>	<b>SVM</b>	<b>RT</b>	<b>NN</b>
COR	0.914	0.881	0.669	0.901	0.837	0.821
DAM	1.461	1.628	9.306	1.553	1.974	1.949
EAR	36.584	41.066	66.892	39.158	49.419	49.148
EQMR	1.942	2.280	12.554	2.046	2.612	2.696

Tabela 9 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 4 análises com as velocidades de 30 km/h como a base de dados

	<b>1ªAnálise</b>	<b>2ªAnálise</b>	<b>3ªAnálise</b>	<b>4ªAnálise</b>
<b>Indicador</b>	<b>LAmx</b>	<b>LAmx</b>	<b>Loudness</b>	<b>Loudness</b>
<b>Modelo</b>	<b>SVM</b>	<b>KNN</b>	<b>NN</b>	<b>KNN</b>
COR	0.845	0.602	0.847	0.829
DAM	1.528	2.371	4.997	4.954
EAR	55.702	86.469	61.751	61.219
EQMR	2.0714	3.143	6.557	6.806

Tabela 10 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 4 análises com as velocidades de 50 km/h como a base de dados

	<b>1ªAnálise</b>	<b>2ªAnálise</b>	<b>3ªAnálise</b>	<b>4ªAnálise</b>
<b>Indicador</b>	<b>LAmx</b>	<b>LAmx</b>	<b>Leq</b>	<b>LAeq</b>
<b>Modelo</b>	<b>SVM</b>	<b>NN</b>	<b>SVM</b>	<b>SVM</b>
COR	0.774	0.709	0.754	0.780
DAM	1.200	1.359	1.498	1.141
EAR	64.186	72.700	72.045	63.114
EQMR	1.599	1.890	1.855	1.544

Tabela 11 – Melhores modelos e respetivos indicadores para as 4 análises com as velocidades de 65 km/h como a base de dados

	<b>1ªAnálise</b>	<b>2ªAnálise</b>	<b>3ªAnálise</b>	<b>4ªAnálise</b>
<b>Indicador</b>	<b>Sharpness MG</b>	<b>LAmx</b>	<b>Sharpness MG</b>	<b>Sharpness MG</b>
<b>Modelo</b>	<b>SVM</b>	<b>SVM</b>	<b>NN</b>	<b>NN</b>
COR	0.754	0.676	0.614	0.634
DAM	0.171	1.171	0.211	0.213
EAR	67.206	76.017	82.944	83.868
EQMR	0.215	1.428	0.267	0.306

Dado o melhor desempenho para todas as análises ter sido obtido através do modelo SVM com o parâmetro LAm<sub>ax</sub>, na Figura 56 é apresentada a relação entre o LAm<sub>ax</sub> estimado e o LAm<sub>ax</sub> calculado. Os resultados das restantes análises, que não são apresentados neste capítulo, são apresentados no Anexo II.

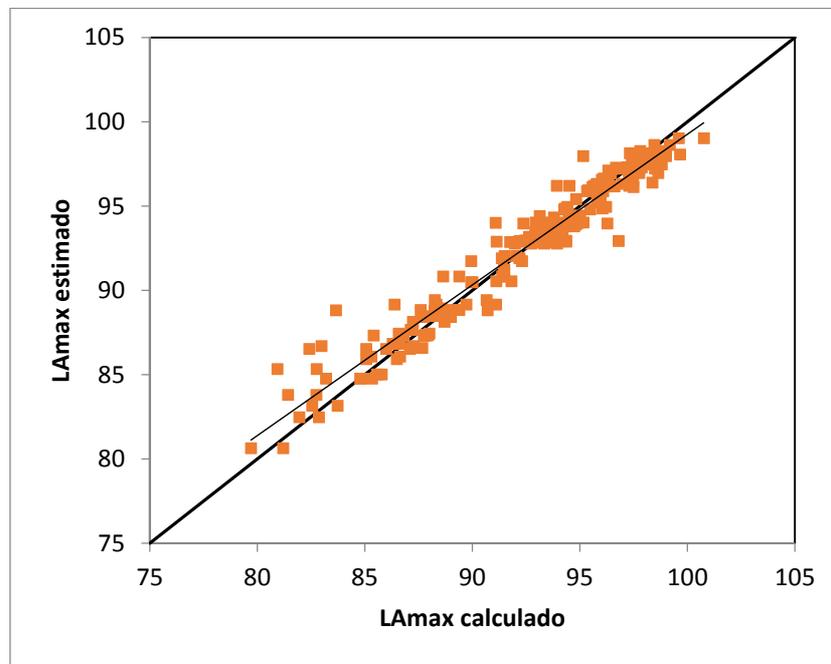


Figura 56 – Exemplo da técnica (SVM) através de pontos de dispersão (LAm<sub>ax</sub> estimado vs LAm<sub>ax</sub> calculado)

#### 4.7.2 Avaliação das importâncias das variáveis de entrada em função das velocidades

##### 4.7.2.1 1ª Análise – variáveis de entrada: tipo de pavimento, patologias, textura e velocidades

Nesta subsecção serão avaliadas as importâncias relativas das variáveis de entrada, em função das velocidades, para o melhor modelo representativo de cada indicador. Para isso, para além da consideração da base de dados completa, para incluir todas as velocidades, foram consideradas três bases com menor número de dados para considerar velocidades de 30 km/h, de 50 km/h e de 65 km/h.

A Figura 57 representa as importâncias relativas das variáveis de entrada (tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade), para os diferentes indicadores acústicos e psicoacústicos,

em função das diversas velocidades. Para esta análise as técnicas que desempenham melhores resultados são SVM e KNN, sendo em alguns casos, NN.

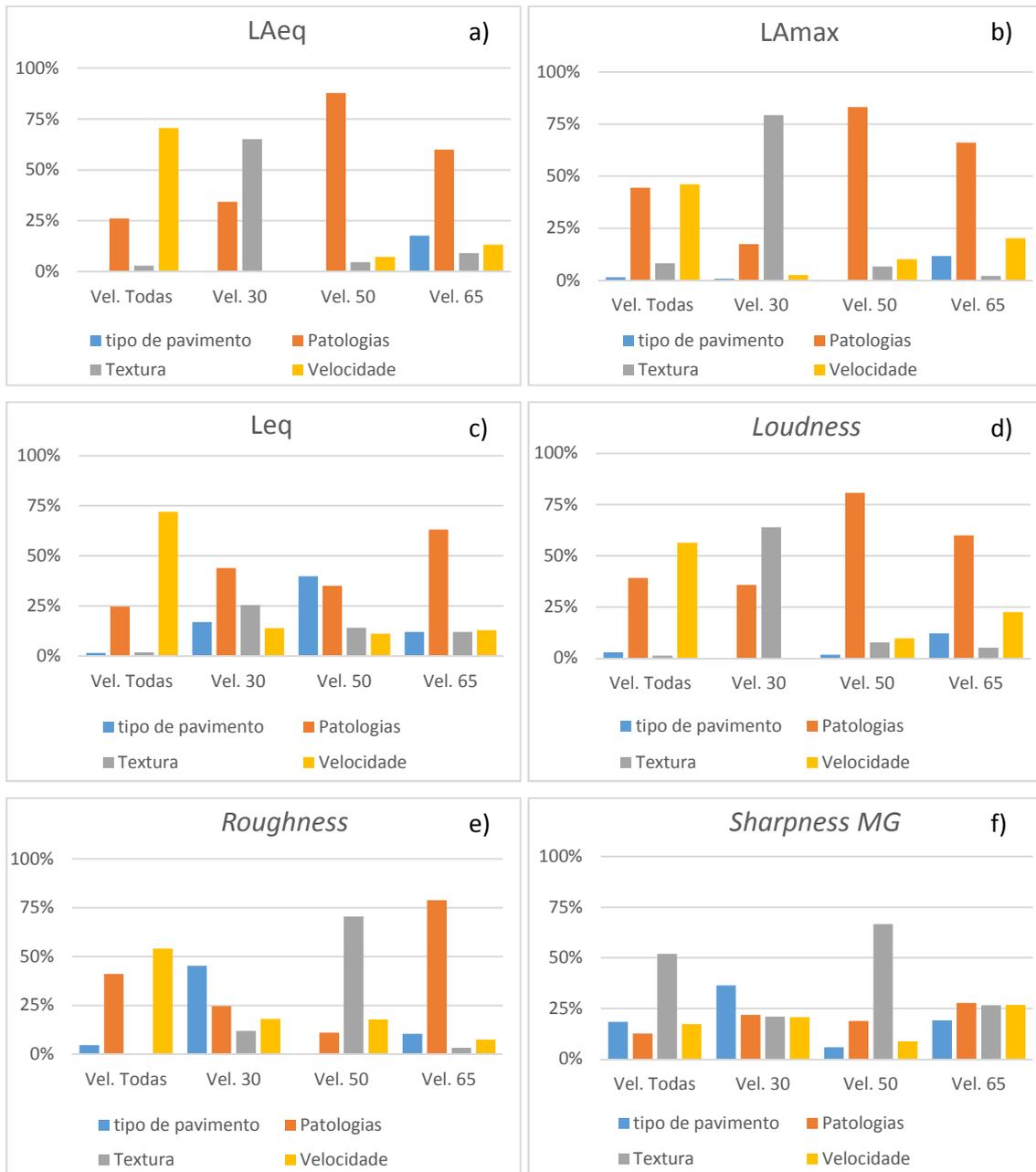


Figura 57 – Importâncias relativa das variáveis, numa 1ª análise, em função das velocidades, para: a) LAeq; b) LAmax; c) Leq; d) Loudness; e) Roughness; f) Sharpness MG

No que diz respeito à avaliação da qualidade, considerando na base de dados todas as velocidades, para todos os indicadores acústicos e para os indicadores psicoacústicos Loudness e Roughness, apresentam-se importâncias praticamente repartidas entre as

variáveis da velocidade e das patologias, sendo pequenas as percentagens atribuídas ao tipo de pavimento e à textura. O indicador psicoacústico *Sharpness MG* foge à regra, apresentado menos de 25% nas variáveis tipo de pavimento, velocidade e patologias e mais de 50% de importância à textura.

Avaliando os modelos estabelecidos para cada nível de velocidade, para 30 km/h pode-se constatar que os indicadores acústicos, com ponderação A, apresentam uma elevada importância à textura, superior a 50% para o nível de pressão sonora equivalente e superior a 75% para o nível de pressão sonora máxima. Para estes indicadores a restante importância pertence às patologias, sendo praticamente nula nas outras variáveis. Para o nível de pressão sonora equivalente sem ponderação A, as importâncias estão mais repartidas, sendo as patologias as que representam quase 50% e a textura 25%. O *Loudness*, semelhante aos indicadores acústicos apresenta mais de 50% de importância na textura e 25% nas patologias, sendo a restante percentagem repartida pela velocidade e tipo de pavimento. Os indicadores psicoacústicos *Roughness* e *Sharpness MG* apresentam uma repartição das importâncias semelhante, sendo superior a 25% para o tipo de pavimento e a restante percentagem dividida pelas outras três variáveis.

Para a velocidade de 50 km/h constata-se que o nível de pressão sonora equivalente com ponderação A, o nível de pressão sonora máxima e o *Loudness* têm importâncias superiores a 75% para as patologias, sendo os restantes 25% repartidos pelas outras variáveis. Para o nível de pressão sonora sem ponderação A, as importâncias distribuem-se pelas variáveis de entrada, sendo ligeiramente superior para o tipo de pavimento e para as patologias. Os indicadores psicoacústicos, *Roughness* e *Sharpness MG*, apresentam mais de 50% da importância para a variável textura e menos de 25% para as patologias e velocidade.

Para a velocidade de 65 km/h pode-se constatar, para o nível de pressão sonora equivalente sem e com ponderação A, para o nível de pressão sonora máxima e para o *Loudness* que mais de 50% das importâncias corresponde às patologias, sendo os restantes 50% repartidos pelas outras variáveis. O indicador psicoacústico, *Sharpness MG* apresenta as importâncias repartidas por todas as variáveis, o *Roughness* apresenta mais de 75% das importâncias para as patologias.

De modo geral, para velocidades reduzidas os indicadores apresentam uma elevada importância relativa à textura, sendo a variável das patologias também importante. Para as restantes velocidades as patologias apresentam uma elevada importância.

#### **4.7.2.2 2ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a velocidade**

A Figura 58 representa as importâncias relativas às variáveis de entrada (tipo de pavimento, patologias e velocidade), para os diferentes indicadores acústicos e psicoacústicos, em função de todas as velocidades. Para esta análise as técnicas que desempenham melhores resultados são SVM e KNN, sendo em alguns casos, NN e apenas um caso RT.

No que diz respeito à avaliação das importâncias considerando na base de dados todas as velocidades, apresenta-se, para o nível de pressão sonora equivalente com a ponderação A, para o nível de pressão sonora máxima e para o Roughness mais de 50% de importância relativa às patologias, sendo a restante percentagem referente à variável velocidade pois a percentagem do tipo de pavimento é muito reduzida. O nível de pressão sonora equivalente sem a ponderação A e o *Loudness* apresenta importância relativa à velocidade superior a 50% e para o *Sharpness MG* superior a 75%, sendo a restante percentagem referente à variável das patologias.

Para a velocidade de 30 km/h, 50 km/h e 65km/h, todos os indicadores acústicos e os indicadores psicoacústicos, *Loudness* e *Sharpness MG*, apresentam importâncias relativas às patologias semelhantes, sendo essa superior a 75%. À exceção do indicador acústico, nível de pressão sonora equivalente sem ponderação A, a 65 km/h, que apresenta uma distribuição igual para todas as importâncias. O indicador psicoacústico *Roughness* apresenta, para os três conjuntos de velocidades, uma importância relativa às patologias superior a 50%, sendo os restantes 50% repartidos pelo tipo de pavimento e pelas patologias.

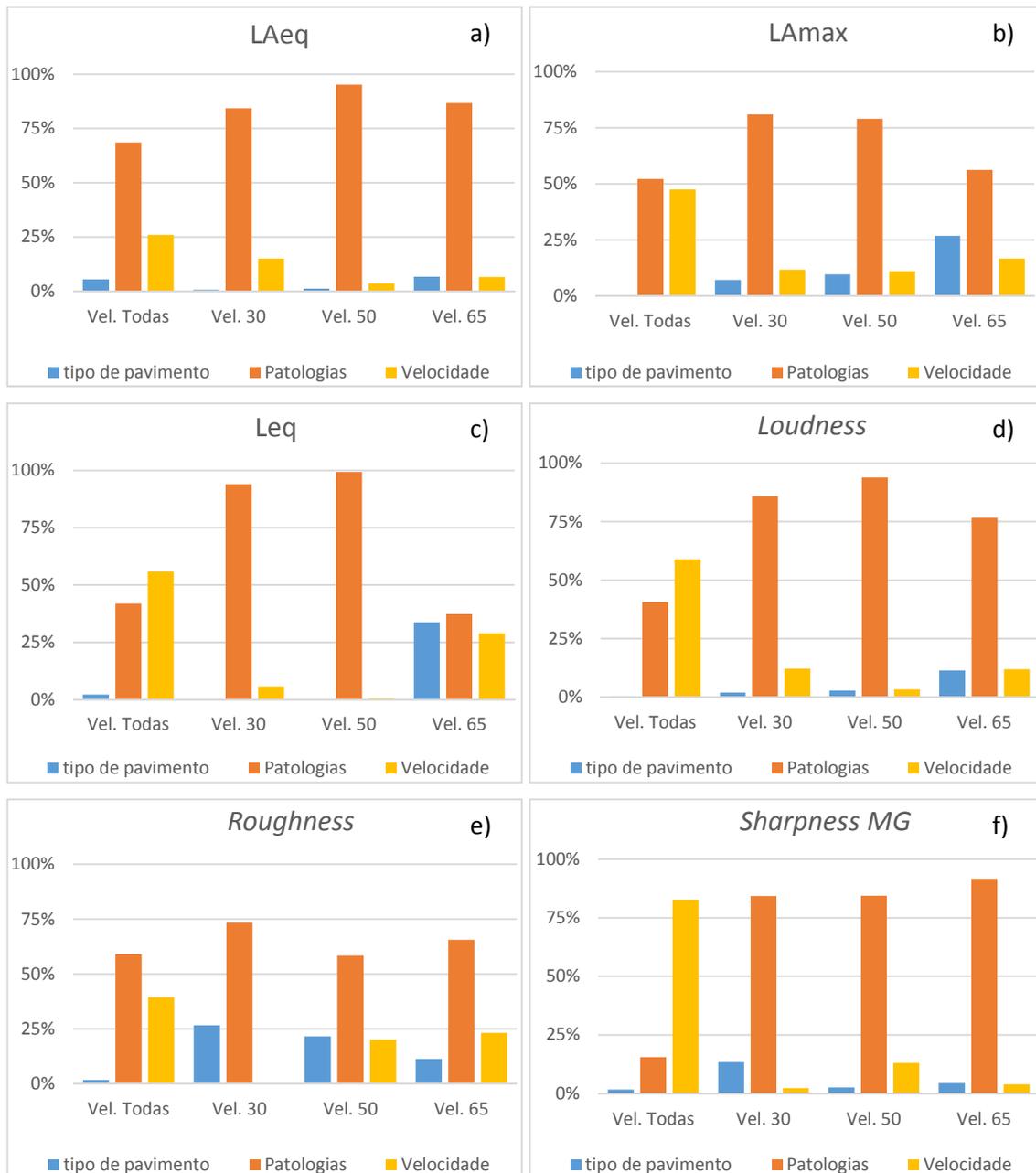


Figura 58 – Importâncias relativa às variáveis, numa 2ª análise, em função das velocidades, para: a) LAeq; b) LAmax; c) Leq; d) Loudness; e) Roughness; f) Sharpness MG

#### 4.7.2.3 3ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a textura

A Figura 59 representa as importâncias relativas às variáveis de entrada (tipo de pavimento, patologias e textura), para os diferentes indicadores acústicos e psicoacústicos. Para esta análise as técnicas que desempenham melhores resultados são NN e SVM, sendo em alguns casos, KNN e apenas um caso RT.

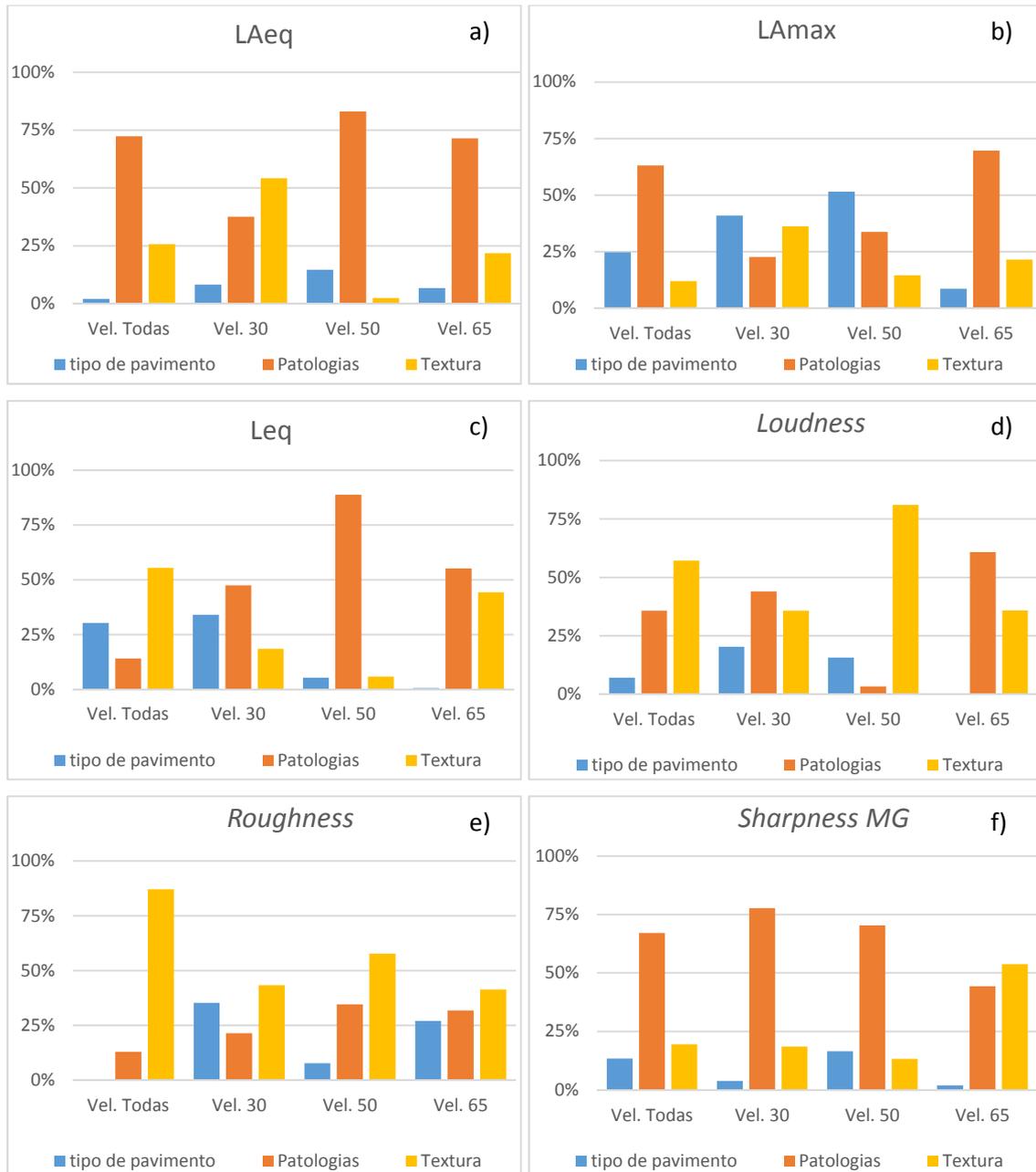


Figura 59 – Importâncias relativa às variáveis, numa 3ª análise, em função das velocidades, para: a) LAeq; b) LAmáx; c) Leq; d) Loudness; e) Roughness; f) Sharpness MG

No que diz respeito à avaliação das importâncias considerando na base de dados todas as velocidades, apresenta-se, para o nível de pressão sonora equivalente com a ponderação A, para o nível de pressão sonora máxima e para o Sharpness mais de 50% da importância relativa às patologias. O nível de pressão sonora equivalente, sem ponderação A e o Loudness apresentam mais de 50% de importância relativa a textura, sendo os restantes 50 % atribuídos às restantes variáveis. O indicador psicoacústico Roughness apresenta mais de 75% da importância atribuída à textura.

Para a velocidade de 30 km/h pode-se constatar que para o indicador acústico, nível de pressão sonora equivalente com ponderação A, existe mais de 50% de importância relativamente à textura, e mais de 25% de importância para as patologias. Para o indicador acústico, nível de pressão sonora máximo e para o indicador psicoacústico *Roughness* as importâncias estão repartidas, sendo mais de 25% importância relativa ao tipo de pavimento e mais de 25% importância relativa à textura. Para o nível de pressão sonora sem ponderação A e para o *Loudness* as importâncias também são repartidas, sendo mais de 25% importância correspondente às patologias, no entanto o nível de pressão sonora considera mais de 25% da importância relativa ao tipo de pavimento e o *Loudness* atribui mais de 25% à textura. O *Sharpness MG* atribui mais de 75% às patologias.

Para a velocidade de 50 km/h pode-se constatar que para os indicadores acústicos, nível de pressão sonora equivalente com e sem ponderação A, mais de 75% da importância é atribuída às patologias. No que diz respeito ao nível de pressão sonora máxima, mais de 50% das importâncias são atribuídas ao tipo de pavimento e mais de 25% às patologias. Para os indicadores *Loudness* e *Roughness* a textura representa uma elevada importância, sendo superior a 75% para o *Loudness* e superior a 50% para o *Roughness*. O indicador *Sharpness MG* apresenta uma importância superior a 50% para as patologias.

Para a velocidade de 65 km/h os indicadores acústicos e o indicador psicoacústico, *Loudness*, apresentam uma importância superior a 50% nas patologias, sendo no caso do nível de pressão sonora equivalente e do *Loudness* repartido com mais de 25% da importância relativa à textura. No caso do *Roughness* as importâncias são repartidas por partes semelhantes, sendo superior a 25% para todas as variáveis. O *Sharpness* apresenta mais de 50% de importância relativo à textura.

De modo geral, as patologias apresentam uma elevada importância, assim como a textura. Para o indicador psicoacústico *Roughness* a textura é a principal variável a considerar.

#### 4.7.2.4 4ª Análise - variáveis de entrada: patologias, textura e velocidade

A Figura 60 representa as importâncias relativas às variáveis de entrada (patologias, textura e velocidade), para os diferentes indicadores acústicos e psicoacústicos, em função das diversas velocidades, isto é, considerando na base de dados todas as velocidades, as velocidades de 30 km/h, as velocidades de 50 km/h e as velocidades de 65km/h. Para esta análise as técnicas que desempenham melhores resultados são SVM e KNN, sendo em alguns casos, NN e apenas um caso RT.

No que diz respeito à avaliação considerando na base de dados todas as velocidades, para o nível de pressão sonora máxima, para o nível de pressão sonora sem ponderação A, para o *Loudness* e para o *Sharpness*, apresenta-se uma importância superior a 75% para a variável da velocidade. Para o indicador acústico, nível de pressão sonora com ponderação A, a importância é superior a 50% para a velocidade e superior a 25% para as patologias. Para o indicador psicoacústico *Roughness* a importância é reduzida para a variável velocidade, superior a 50% para a textura e superior a 25% para as patologias.

Para a velocidade de 30 km/h, a variável textura apresenta uma importância superior 50% para os indicadores acústicos, nível de pressão sonora equivalente com ponderação A, nível de pressão sonora máximo e para o indicador psicoacústico, *Sharpness*. O indicador acústico, nível de pressão sonora equivalente, sem a ponderação A, e o indicador psicoacústico, *Loudness* apresentam uma importância superior a 25%, sendo para o indicador acústico repartido por todas as variáveis e para o indicador psicoacústico apenas para as variáveis patologia e textura. O *Roughness* apresenta uma importância superior a 50% para as patologias.

Para a velocidade de 50 km/h, o nível de pressão sonora equivalente com e sem ponderação A e os indicadores *Sharpness* e *Loudness* apresentam uma importância relativa às patologias superior a 50%. O indicador *Roughness*, assim como o nível de pressão sonora máxima apresenta uma importância superior a 50% para a variável textura e mais de 25% para a variável patologia.

Para a velocidade de 65 km/h, pode-se constatar que a variável patologias apresenta uma importância superior a 50% para o nível de pressão sonora máxima, nível pressão sonora

sem ponderação A e para o indicador *Roughness*. O nível de pressão sonora equivalente com ponderação A, o *Loudness* e o *Sharpness* apresentam uma importância superior a 25%, repartida por todas as variáveis.

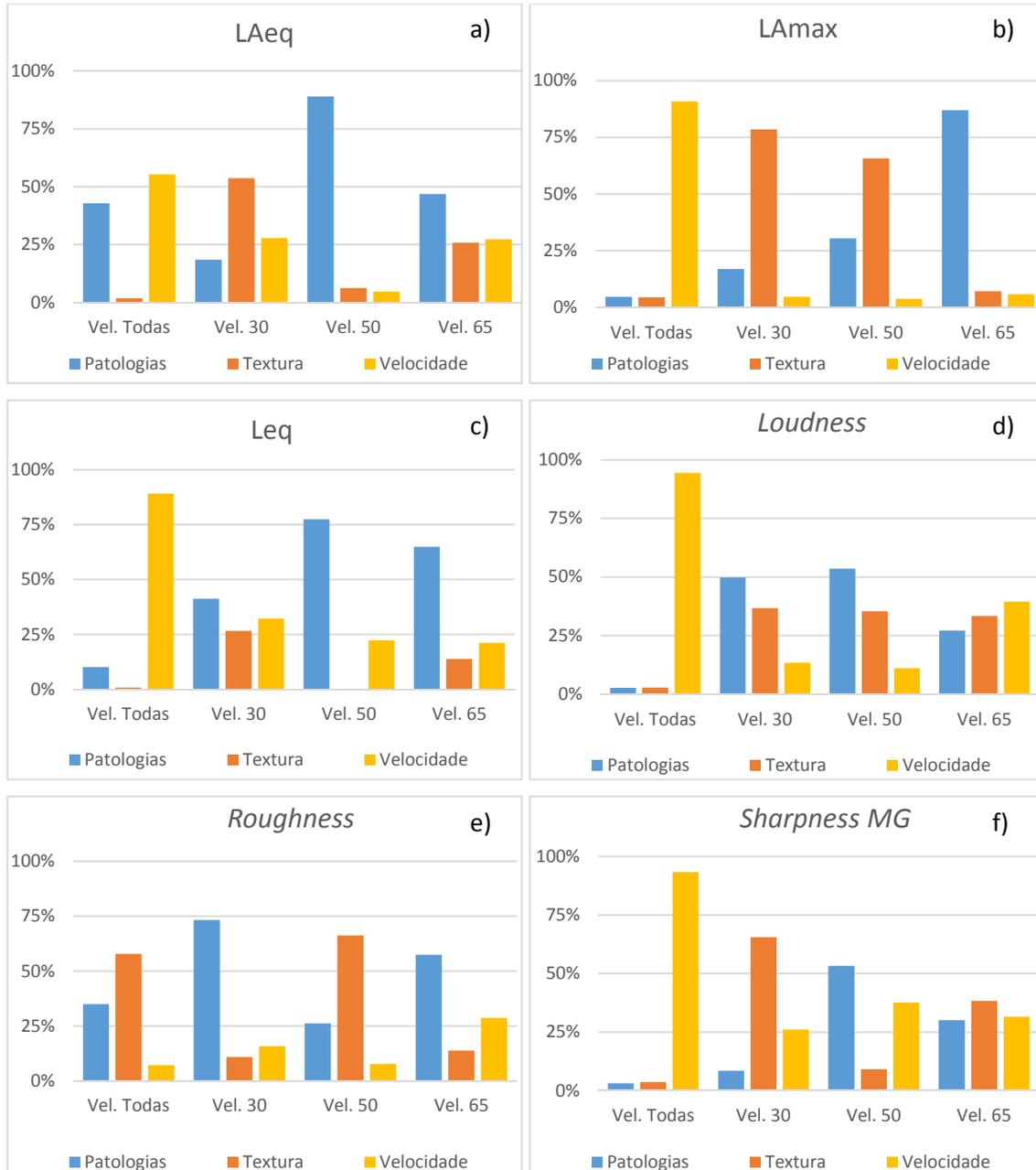


Figura 60 – Importâncias relativa às variáveis, numa 4ª análise, em função das velocidades, para: a) LAeq; b) LAmax; c) Leq; d) Loudness; e) *Roughness*; f) *Sharpness MG*

De forma geral, é dada uma elevada importância à variável da velocidade quando se executa a avaliação com todas as velocidades na base de dados. Quando as velocidades são agrupadas, as importâncias são divididas entre as patologias e a textura.

**4.7.2.5 5ª Análise - variáveis de entrada: patologias e velocidade**

A Figura 61 representa as importâncias relativas às variáveis de entrada (patologias e velocidade), para os diferentes indicadores acústicos e psicoacústicos. Esta avaliação apenas é considerada quando a base de dados contém todas as velocidades. Para esta análise as técnicas que desempenham melhores resultados são NN, RT e SVM.

Após a análise pode-se constatar que para todos os indicadores acústicos e para os indicadores psicoacústicos *Loudness* e *Sharpness* a variável velocidade desempenha quase 100% de importância. O indicador *Roughness* é o único que é discrepante, apresentando mais de 75% da importância na variável patologias.

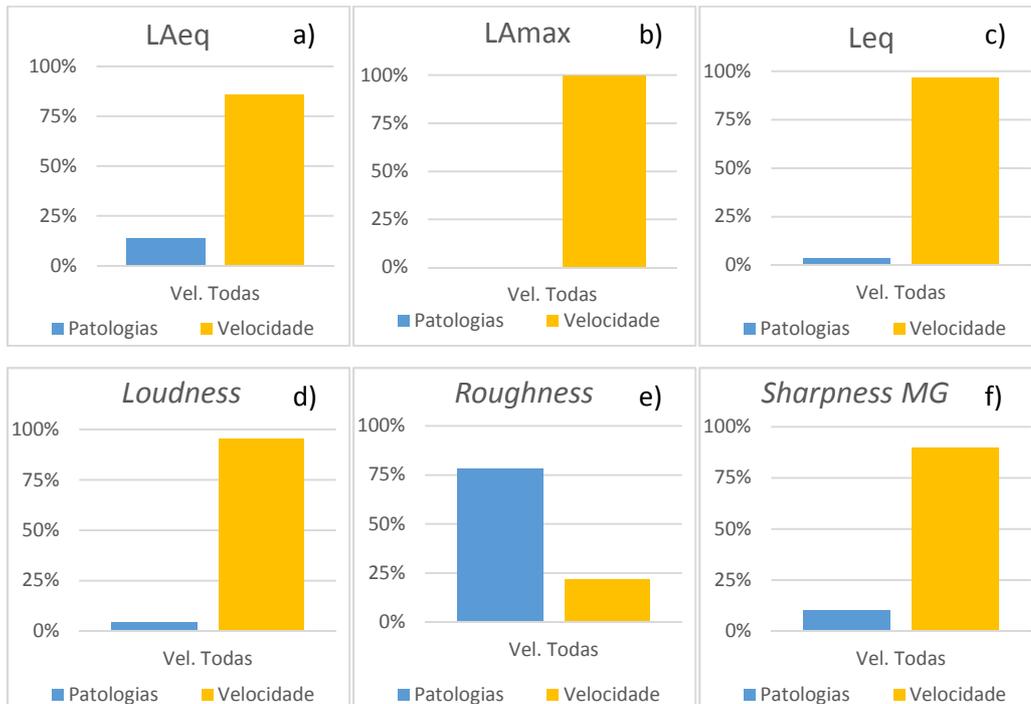


Figura 61 – Importâncias relativa às variáveis, numa 5ª análise, para: a) LAeq; b) LAmax; c) Leq; d) *Loudness*; e) *Roughness*; f) *Sharpness MG*

### 4.7.3 Avaliação da importância das variáveis de entrada em função dos indicadores

#### 4.7.3.1 1ª Análise – variáveis de entrada: tipo de pavimento, patologias, textura e velocidades

Para a variável tipo de pavimento, representada na Figura 62, as importâncias para as velocidades todas e para 65 km/h são semelhantes para todos os indicadores apresentando uma ligeira subida no indicador *Roughness*, ou seja, o tipo de pavimento tem uma influência reduzida para todos os indicadores, inclusive o indicador *Roughness* pois apesar da subida só apresenta uma importância de 20%. Para as velocidades 30 km/h e 50 km/h existe um pico no nível de pressão sonora equivalente, assim sendo, pode-se constatar que o tipo de pavimento apresenta alguma influência no nível de pressão, para velocidades reduzidas.

Para a variável patologias, representada na Figura 63, as importâncias para todas as velocidades, para 30 km/h e para 65 km/h apresentam a mesma uniformidade, sendo as importâncias para velocidades 65 km/h superiores. Para a velocidade de 50 km/h existe uma variação das importâncias para cada indicador.

Para a variável textura, representada na Figura 64, as importâncias para todas as velocidades, para 50 km/h e para 65 km/h são semelhantes para todos os indicadores apresentando uma significativa subida no indicador *Roughness*, ou seja, a textura apresenta uma considerável influência no indicador *Roughness*. Pode-se também constatar que para velocidades mais reduzidas, 30 km/h, a variável textura apresenta uma maior importância, principalmente para o nível de pressão sonora equivalente com ponderação A, para nível de pressão sonora máximo, para o *Loudness* e para o *Roughness*.

Para a variável velocidade, representada na Figura 65, as importâncias para 30 km/h, para 50 km/h e para 65 km/h apresentam a mesma uniformidade, sendo a sua importância reduzida (inferior a 20%). Para todas as velocidades, as importâncias relativas à velocidade são muito superiores para todos os indicadores, como seria de esperar.

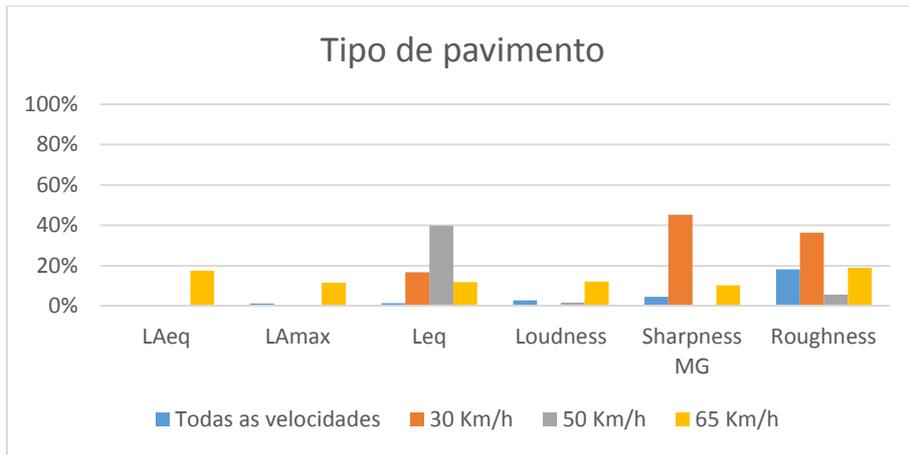


Figura 62 – Importância da variável tipo de pavimento, em função dos indicadores para a 1ª análise

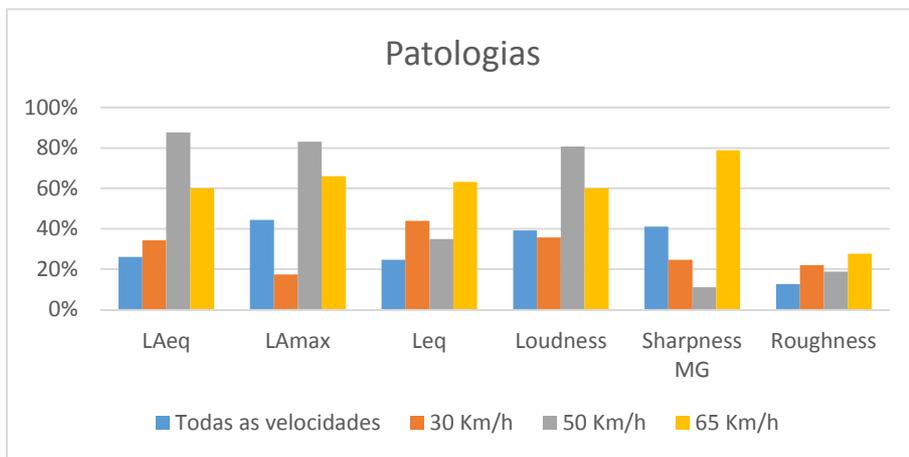


Figura 63 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 1ª análise

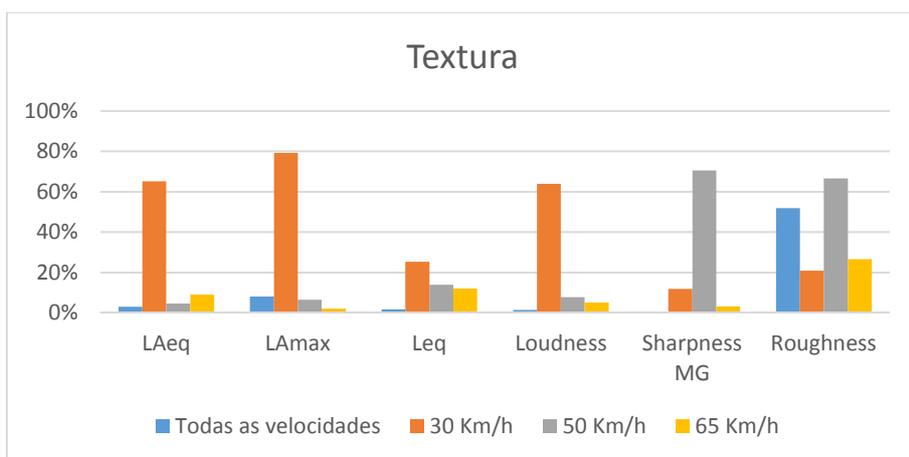


Figura 64 – Importância da variável textura, em função dos indicadores para a 1ª análise

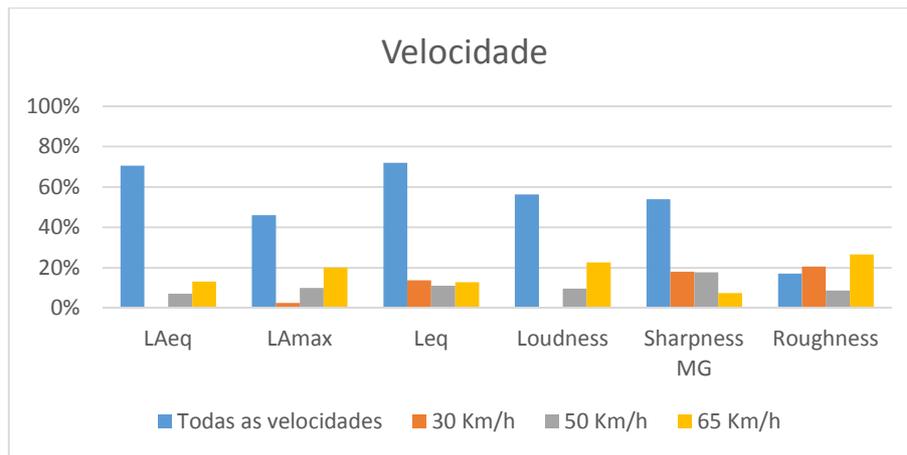


Figura 65 – Importância da variável velocidade, em função dos indicadores para a 1ª análise

#### 4.7.3.2 2ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a velocidade

Para a variável velocidade, representada na Figura 66, as importâncias para 30 km/h, para 50 km/h e para 65 km/h, assim como na 1ª análise, apresentam a mesma uniformidade, sendo a sua importância reduzida. Para todas as velocidades, as importâncias relativas à velocidade são muito superiores para todos os indicadores.

Para a variável patologias, representada na Figura 67, as importâncias para 30 km/h e para 50 km/h apresentam a mesma uniformidade, com importâncias altas para todos os indicadores, aproximadamente 80%. A 65 km/h existe uma redução da importância para o nível de pressão sonora máximo e para nível de pressão sonora equivalente sem ponderação A. Para todas as velocidades, as importâncias relativas às patologias são ligeiramente inferiores às importâncias das velocidades 30, 50 e 65 km/h, no entanto continuam a ter uma relevante importância para todos os indicadores.

Para a variável tipo de pavimento, representada na Figura 68, as importâncias para todas as velocidades, para 30 km/h e para 50 km/h são semelhantes para todos os indicadores apresentando uma ligeira subida no indicador *Roughness*, ou seja, o tipo de pavimento tem uma influência reduzida para todos os indicadores, inclusive o indicador *Roughness* pois apesar da subida só apresenta uma importância, aproximadamente, de 20%. Para 65 km/h as importâncias relativas ao tipo de pavimento apresentam uma ligeira subida para o nível de pressão sonora máximo e para o nível de pressão sonora equivalente sem ponderação A.

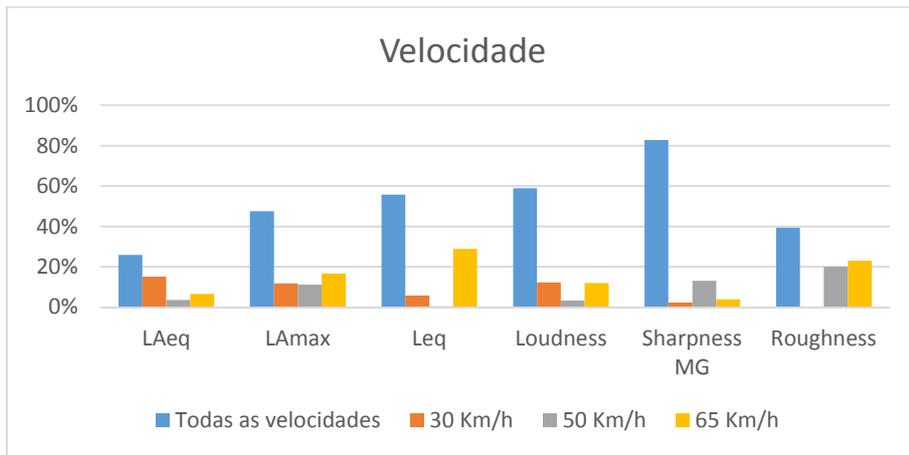


Figura 66 – Importância da variável velocidade, em função dos indicadores para a 2ª análise

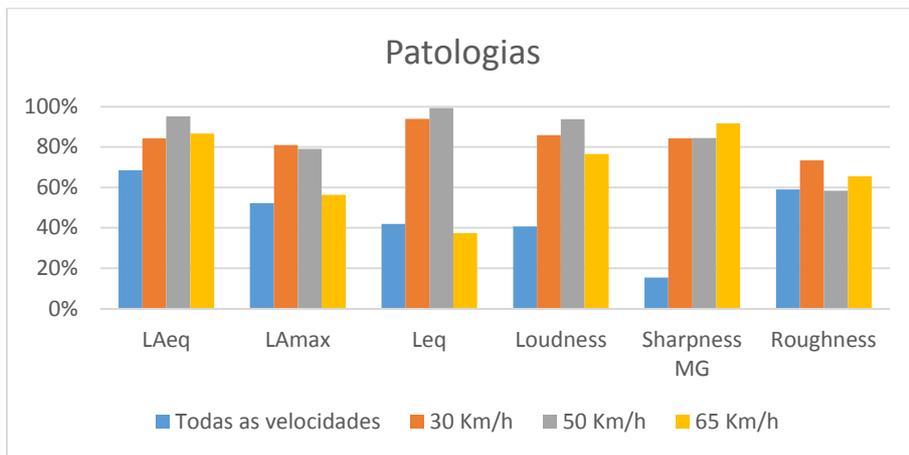


Figura 67 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 2ª análise

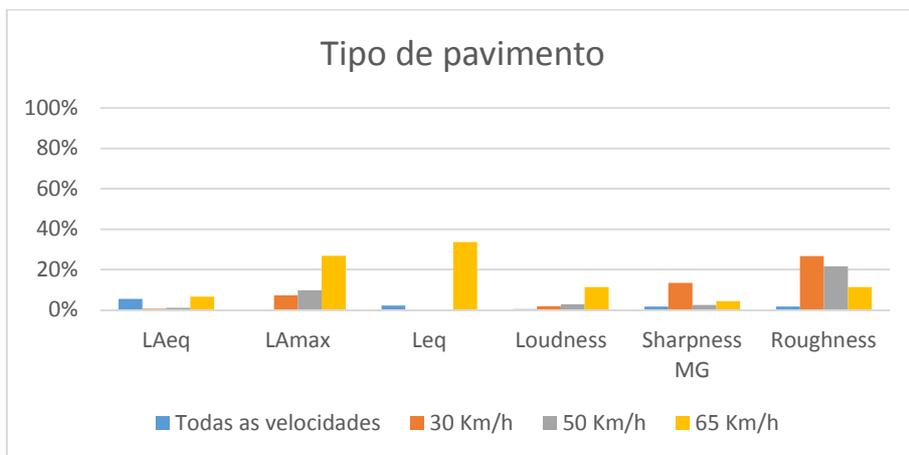


Figura 68 – Importância da variável tipo de pavimento, em função dos indicadores para a 2ª análise

#### 4.7.3.3 3ª Análise - variáveis de entrada: tipo de pavimento, as patologias e a textura

Para a variável textura, representada na Figura 69, as importâncias para a velocidade de 65 km/h é semelhante para todos os indicadores. No entanto, para as outras velocidades apresenta uma subida para os indicadores psicoacústicos *Loudness* e *Roughness*.

Para a variável patologias, representada na Figura 70, as importâncias são muito variáveis em quase todos os indicadores, à exceção dos indicadores psicoacústicos *sharpness* e *roughness*, apresentando nestes indicadores alguma proximidade referente à importância das patologias.

Para a variável tipo de pavimento, representada na Figura 71, as importâncias para 30 km/h, para 50 km/h e para 65 km/h, assim como para todas as velocidades, apresentam a mesma uniformidade, com uma ligeira subida para o indicador acústico, nível de pressão sonora máximo.

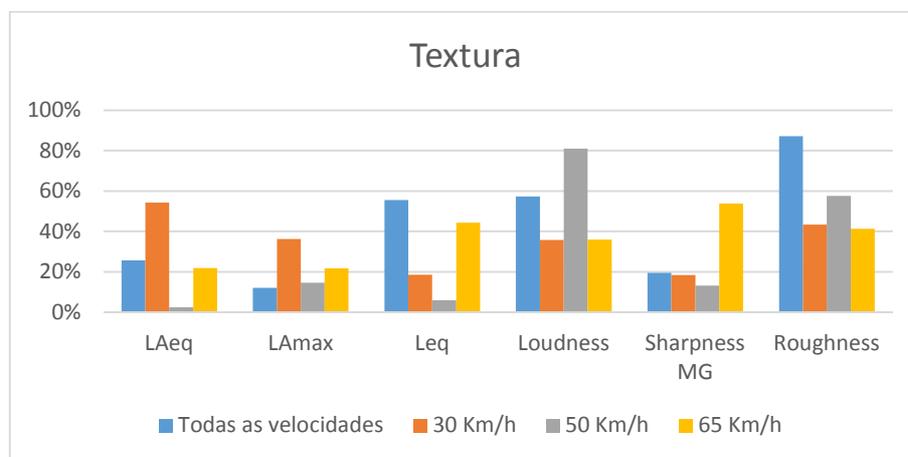


Figura 69 – Importância da variável textura, em função dos indicadores para a 3ª análise

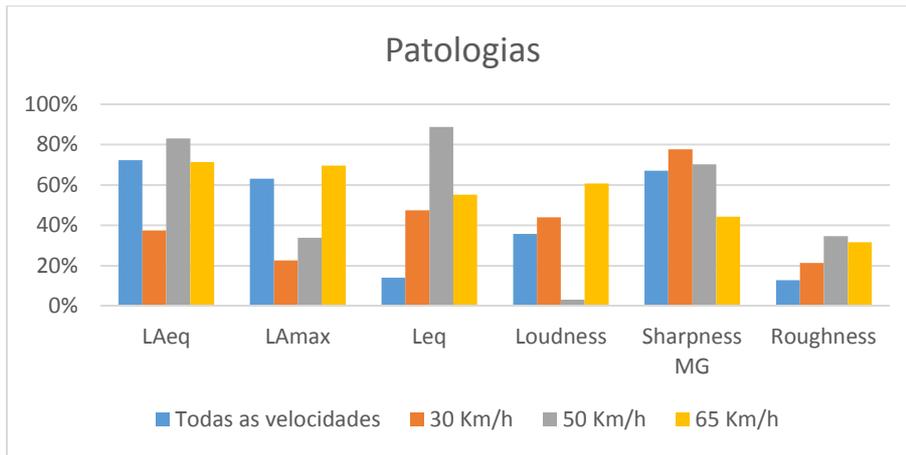


Figura 70 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 3ª análise

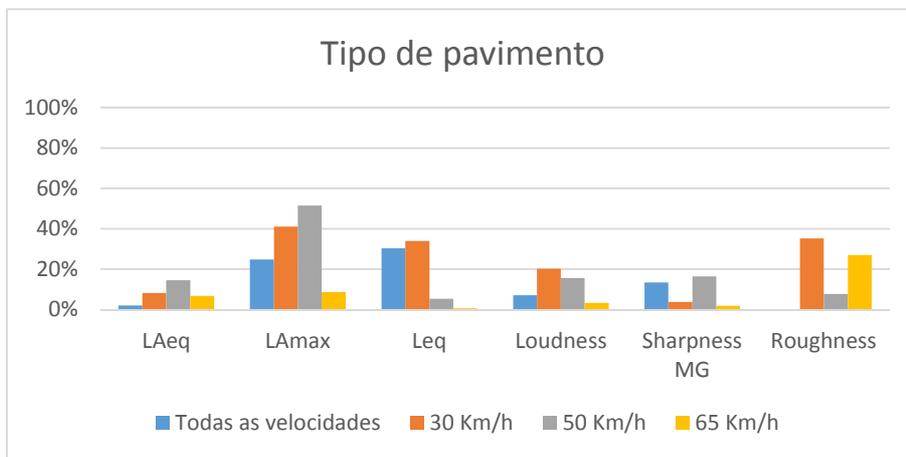


Figura 71 – Importância da variável tipo de pavimento, em função dos indicadores para a 3ª análise

**4.7.3.4 4ª Análise - variáveis de entrada: patologias, textura e velocidade**

Para a variável textura, representada na Figura 72, pode-se constatar que quando são consideradas todas as velocidades esta variável não apresenta uma elevada importância, para todos os indicadores exceto o indicador psicoacústico *Roughness* que apresenta uma elevada importância para este indicador. Pode-se também detetar a influência da textura a reduzidas velocidades, pois as maiores importâncias desta variável correspondem à velocidade de 30 km/h.

Para a variável patologias, representada na Figura 73, pode-se constatar que quando são consideradas todas as velocidades esta variável não apresenta uma elevada importância, para

todos os indicadores exceto o nível de pressão sonora equivalente com ponderação A e o *Roughness*. Quando são consideradas as velocidades agrupadas em 30, 50 e 65 km/h as importâncias relativas às patologias são superiores.

Para a variável velocidade, representada na Figura 74, as importâncias para 30 km/h, para 50 km/h e para 65 km/h, assim como nas outras análises em que a velocidade é uma variável de entrada, apresentam a mesma uniformidade, sendo a sua importância reduzida. Para todas as velocidades, as importâncias relativas à velocidade são muito superiores para todos os indicadores.

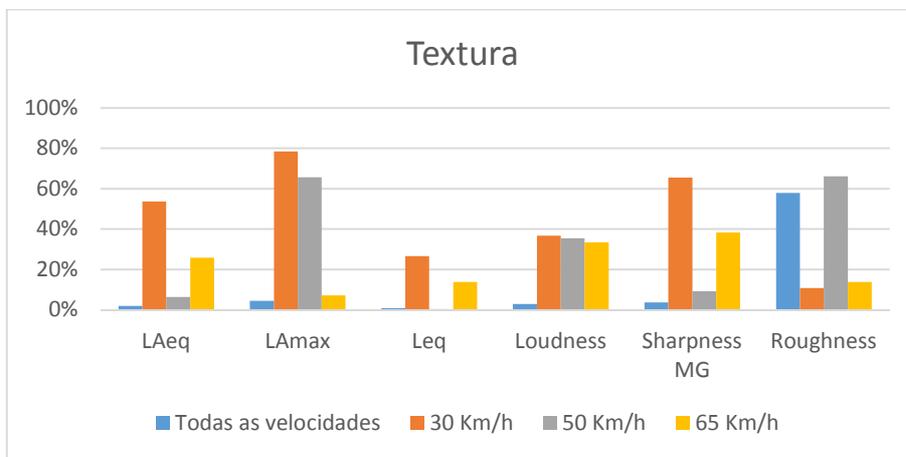


Figura 72 – Importância da variável textura, em função dos indicadores para a 4ª análise

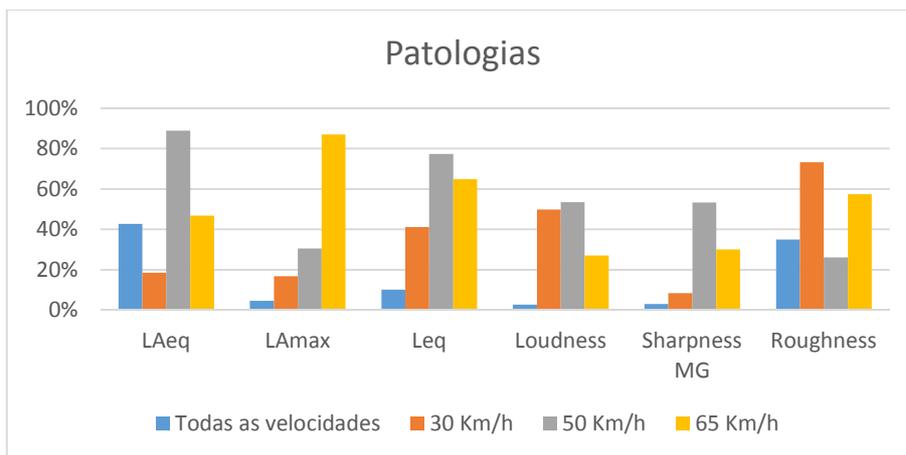


Figura 73 – Importância da variável patologias, em função dos indicadores para a 4ª análise

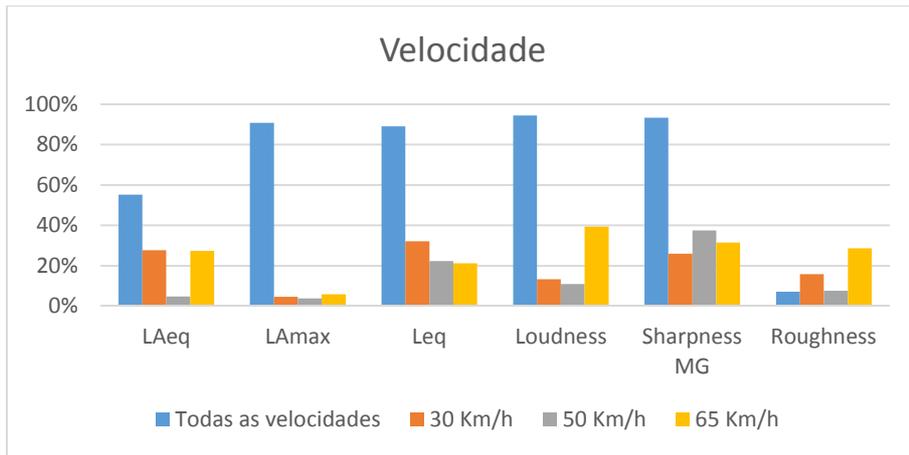


Figura 74 – Importância da variável velocidade, em função dos indicadores para a 4ª análise

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Conclusões gerais

Atualmente, o ruído da interação pneu-pavimento tem sido alvo de vários estudos, sendo a redução deste um objetivo a atingir a nível mundial. Para tal, são analisados os fatores que o influenciam. Esses fatores passam pela velocidade dos veículos, composição do tráfego, condições da superfície do pavimento, condições meteorológicas, assim como pelas características físicas e psicológicas dos condutores. Constata-se desta forma que o ruído provocado pelo contacto pneu-pavimento é bastante complexo.

A superfície do pavimento, ao longo do tempo, com sucessivas passagens dos veículos e alterações climáticas, desenvolve degradações, provocando para além de desconforto aos condutores um incremento no ruído pneu-pavimento. Apesar de existir um elevado número de estudos do ruído pneu-pavimento, nenhum deles apresenta as degradações como fator influente no ruído. Neste contexto, esta dissertação teve como objetivo principal avaliar o ruído provocado pela interação pneu-pavimento e o impacto das degradações no mesmo.

Para uma eficaz descrição do som e seu período de tempo são geralmente utilizados determinados indicadores, que caracterizam o ambiente acústico exterior. De forma a conceber uma melhor previsão e comparação de diferentes pavimentos, torna-se importante complementar essa avaliação acústica com indicadores psicoacústicos, que dependem das características físicas e psicológicas dos indivíduos. Para tal, neste estudo foram selecionados como indicadores acústicos o nível de pressão sonora equivalente, com e sem ponderação A, o nível de pressão sonora máxima, e como indicadores psicoacústicos o *Loudness*, o *Sharpness* e o *Roughness*.

As aquisições do ruído pneu-pavimento foram efetuadas para 11 trechos com patologias distintas e tipo de pavimento: 3 trechos em Microbetão Betuminoso (MBB), 4 trechos em Betão Betuminoso (BB) e 4 trechos com Mistura de Betume Modificado com borracha (MBMB).

Para cada trecho existe um tipo de degradação: pele de crocodilo, desagregação e fendilhamento, ou nenhuma degradação. Estas aquisições foram efetuadas segundo o método da proximidade imediata (CPX), permitindo a avaliação direta do ruído pneu-pavimento.

Após a análise dos resultados obtidos, revelou-se que os pavimentos em betão betuminoso (BB) são os que apresentam níveis de ruído mais reduzidos, isto é, apresentam os valores mais baixos, em comparação com os outros pavimentos, para todos os indicadores acústicos e psicoacústicos, com a exceção do indicador *Sharpness* onde os seus valores são superiores. Deste modo, os pavimentos em microbetão betuminoso (MBB) e mistura betuminosa modificada com borracha (MBMB) são os que apresentam níveis de ruído superiores. Também, como expectável, constatou-se o aumento dos valores dos indicadores acústicos com o aumento da velocidade.

Sendo a avaliação das degradações o ponto fundamental do estudo, constatou-se que, como se previa, as degradações tem uma influência significativa no ruído gerado pelo contacto pneu-pavimento. Essa influência é notada em todos os indicadores acústicos, bem como no *Loudness*, verificando-se um aumento desses indicadores comparando os pavimentos sem degradações e com degradação. A comparação dos indicadores obtidos para os diversos tipos de degradações mostrou que os pavimentos que apresentam desagregação e pele de crocodilo influenciam de forma mais significativa o ruído do que os pavimentos fendilhados. Os valores do indicador psicoacústico *Roughness* não aumentam com a velocidade, no entanto verifica-se um aumento dos valores de *Roughness* nos pavimentos com degradações, principalmente em pavimentos que apresentam pele de crocodilo e fendilhamento.

Assim como na avaliação das degradações em função da velocidade, em função da textura também se verifica uma influência das degradações, sendo os pavimentos com desagregação e pele de crocodilo os que mais influenciam a textura, e conseqüentemente, o ruído contacto pneu-pavimento. Para a análise da textura, verifica-se no indicador *Roughness* uma evolução dos valores deste em função da profundidade média do perfil, no entanto essa evolução só é perceptível em pavimentos fendilhados e com desagregação.

Para a modelação do ruído pneu-pavimento aplicou-se as técnicas Data Mining (DM), pois estas apresentam uma elevada taxa de sucesso na avaliação do ruído pneu-pavimento,

permitindo ainda avaliar o impacto das variáveis consideradas no modelo. Na aplicação desta técnica utilizaram-se diversos modelos, o que permitiu identificar o mais adequado para a avaliação do ruído pneu-pavimento.

Foram elaborados diversos modelos, fazendo variar as variáveis de entrada e de saída integradas na base de dados. Das diversas análises efetuadas pode-se concluir que os melhores resultados referem-se à base de dados completa, isto é, a análise em que as variáveis de entrada são o tipo de pavimento, as patologias, a textura e a velocidade. Quando a base de dados apresenta todas as velocidades, pode-se constatar que as importâncias estão inseridas, maioritariamente, na variável velocidade, quando na análise se agrupa as velocidades, em 30, 50 e 65 km/h, a variável das patologias é a que apresenta maiores valores de importância. Na análise em que as variáveis de entrada são apenas as patologias e a velocidade, verifica-se que o indicador *Roughness*, contrariamente aos outros indicadores, apresenta maiores importâncias para as patologias, ou seja, alteração da superfície do pavimento.

Para os indicadores nível de pressão sonora máximo, nível de pressão sonora, sem ponderação A, *Loudness* e *Sharpness* o melhor modelo é o que resulta da utilização das máquinas vetor de suporte (SVM). Para o indicador acústico, nível de pressão sonora, com ponderação A, o melhor modelo representativo é o que utiliza as redes neuronais (NN) e máquinas vetor de suporte (SVM). No que diz respeito ao indicador *Roughness* o melhor modelo representativo é o máquinas vetor de suporte (SVM) e o k-vizinhos próximos (KNN).

De um modo geral, pode-se concluir que as degradações têm influência no ruído pneu-pavimento, sendo essa influência superior em pavimentos com desagregação e pele de crocodilo. De acordo com os resultados da modelação do ruído, pode-se constatar que as patologias assumem uma elevada importância no ruído pneu-pavimento.

## **5.2 Desenvolvimentos futuros**

Após a conclusão da dissertação é possível enumerar alguns aspetos a desenvolver futuramente, de forma a complementar o trabalho iniciado.

No desenvolvimento desta dissertação, observou-se, no que diz respeito à modelação do ruído, que a base de dados recolhida é reduzida, pois as técnicas utilizadas foram desenvolvidas para obter modelos de previsão com base em grandes volumes de dados. Assim sendo, pode-se considerar como desenvolvimentos futuros um aumento da base de dados, tendo como ponto de partida a avaliação de um maior número de pavimentos, assim como mais degradações dos mesmos.

De forma a complementar e melhorar a avaliação do ruído em pavimentos com degradações poderá ser interessante o estudo dos espectros e o impacto das degradações nos mesmos, propondo-se assim a análise dos espectros, para mesmos pavimentos, sem degradações e com diferentes degradações.

Propõem-se ainda a avaliação do incómodo gerado pelo ruído dos diferentes tipos de pavimentos com diferentes degradações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Antunes, M., Coutinho, A., Freitas, E., Paulo, J. (2011). Camadas de desgaste para a redução do ruído de tráfego-Avaliação do ruído em pavimentos em serviço.
- Antunes, S.M.M.d.S. (2011). Avaliação do ambiente sonoro em zonas urbanas: integração de aspectos qualitativos.
- Cabral, M.F.F., Albuquerque, F.S., de Freitas Neto, O., Albuquerque, T.M.A. (2014). Estudo dos mecanismos de geração de ruído de tráfego na interface pneu-pavimento, *TRANSPORTES*, Vol. 22 (1), pp. 1-20.
- Cabrera, D., Ferguson, S., Rizwi, F., Schubert, E. (2008). PsySound3: a program for the analysis of sound recordings, *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 123 (5), pp. 3247.
- Cabrera, D., Ferguson, S., Schubert, E. (2007). 'PsySound3': Software for Acoustical and Psychoacoustical Analysis of Sound Recordings.
- Callai, S.C. (2011). *Estudo do ruído causado pelo tráfego de veículos em rodovias com diferentes tipos de revestimentos de pavimentos*, Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Costa, J.M.F.d. (2014). *Estudo do efeito da temperatura no ruído pneu-pavimento e nos parâmetros acústicos das camadas superficiais*, Dissertação de mestrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- Cunha, C.A.C.d. (2013). *Perceção de ruído de tráfego rodoviário*, Dissertação mestrado integrado, Universidade do Minho, Guimarães.
- EEA (2014). *Noise in Europe*, European Environment Agency.
- EP – Estradas de Portugal, S.A. (2008). *Catálogo de Degradações dos Pavimentos Rodoviários - Volume 1: Projecto de Reabilitação*.
- Fletcher, H., Munson, W.A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation, *Bell System Technical Journal*, Vol. 12 (4), pp. 377-430.
- Freitas, E., Mendonça, C., Santos, J.A., Murteira, C., Ferreira, J.P. (2012a). Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Vol. 17 (4), pp. 321-326.
- Freitas, E., Tinoco, J., Soares, F., Costa, J., Cortez, P., Pereira, P. (2015). Modelling Tyre-Road Noise with Data Mining Techniques, *Archives of Acoustics*, Vol. 40 (4), pp. 547-560.
- Freitas, E.F. (2008). Contribuição da Superfície dos Pavimentos para a Produção de Ruído.
- Freitas, E.F., Machado, P., Freitas, C. (2012b). *Avaliação e modelação do ruído de contato pneu-pavimento*, Acústica 2012: VIII Congresso Ibero-americano de Acústica,(TECNIACUSTICA2012), SPA, p. 1-10.
- Freitas, E.F., Machado, P., Raimundo, I. (2012c). Caracterização do ruído pneu-pavimento nas estradas portuguesas.
- Freitas, E.F., Machado, P., Raimundo, I. (2012d). Gestão da velocidade e do ruído rodoviário, *Gestão da Velocidade e do Ruído Rodoviário*, Guimarães.
- Freitas, E.F., Pereira, P.A., Santos, L.P., Santos, A.P. (2006). A influência da água no ruído produzido pelo tráfego rodoviário.
- Freitas, E.F., Santos, A., Santos, L.P. (2008). Estudo do efeito do tipo de pneu na geração de ruído rodoviário.

Freitas, M.R.A. (2012). *Avaliação numérica do comportamento de reforços de pavimento à reflexão de fendas*, Instituto Politécnico de Bragança, Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

Hanson, D.I., James, R.S., NeSmith, C. (2004). *Tire/pavement noise study, NCAT Report*, Vol. 4 (02).

IA (2004). *O ruído e a cidade*, Instituto do ambiente.

Kumar, K., Parida, M., KATIYAR, V.K. (2011). Road traffic noise prediction with neural networks-a review, *An International Journal Of Optimization And Control: Theories & Applications (IJOCTA)*, Vol. 2 (1), pp. 29-37.

MacDade, A., Cardoso, C., Freitas, E.F., Inácio, O. (2012). *Impacto das camadas superficiais dos pavimentos nos mapas de ruído—casos de estudo*, SPA.

Maia, I.M.C. (2013). Caracterização de patologias em pavimentos rodoviários.

Mak, K.-L., Hung, W.-T. (2014). Statistical tyre/road noise modeling in Hong Kong on friction course, *Applied Acoustics*, Vol. 76, pp. 24-27.

Martins, F.F., Almeida, T.A. (2009). Análise da estabilidade de taludes recorrendo a ferramentas inteligentes.

Martins, F.F., Araújo, A.S., Marques, R.F.P. (2008). *Análise da estabilidade e optimização da geometria de taludes recorrendo a técnicas de inteligência artificial*, 11 ° Congresso Nacional de Geotecnia, Sociedade Portuguesa de Geotecnia-Departamento de Eng.ª Civil da FCTUC, p. 131-138.

Martins, F.F., Gabriel, M.A.R., Moreira, L.P.C. (2010). Avaliação da estabilidade de taludes através de técnicas de Data Mining.

Mendonça, C. (2012). Noise perception, psychoacoustic indicators, and traffic noise, *Management of Speed and Traffic Noise, Guimarães, Portugal, May*, pp. 29-30.

Ministério do ambiente, d.o.d.t.e.d.d.r. (2007). *Decreto-Lei n.o 9/2007*, Diário da República.

Olson, H.F. (1972). The measurement of loudness, *Audio Magazine*, pp. 18-22.

Raggam, R.B., Cik, M., Höldrich, R.R., Fallast, K., Gallasch, E., Fend, M., Lackner, A., Marth, E. (2007). Personal noise ranking of road traffic: Subjective estimation versus physiological parameters under laboratory conditions, *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, Vol. 210 (2), pp. 97-105.

Rasmussen, R.O., Bernhard, R.J., Sandberg, U., Mun, E.P. (2007). *The little book of quieter pavements*.

Sandberg, U., Ejsmont, J.A. (2002). *Tyre/road noise reference book*.

Santos, A.P.d.S. (2007). *Estudo da eficácia na redução do ruído de tráfego em pavimentos drenantes*, Dissertação mestrado, Engenharia Rodoviária, Universidade do Minho, Guimarães.

Schmitt, J. (2005). *Pré-processamento para a mineração de dados: uso da análise de componentes principais com escalonamento ótimo*.

Silva, H.M.R.D.d. (2006). Caracterização do Mastique Betuminoso e da Ligação Agregado-Mastique: Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas.

Thomé, A.C.G. (2008). *Redes neurais: uma ferramenta para KDD e data mining*, Artigo.

Wang, Y.S., Shen, G.Q., Guo, H., Tang, X.L., Hamade, T. (2013). Roughness modelling based on human auditory perception for sound quality evaluation of vehicle interior noise, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 332 (16), pp. 3893-3904.

WHO (2011). *Health and sustainable development - Noise*, WHO; <http://www.who.int/sustainable-development/transport/health-risks/noise/en/>; Acedido em 26/02/2016.

Zhou, G., Wang, L., Wang, D., Reichle, S. (2009). Integration of GIS and data mining technology to enhance the pavement management decision making, *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 136 (4), pp. 332-341.

Zwicker, E., Fastl, H. (2013). *Psychoacoustics: Facts and models*, Springer Science & Business Media.



## **ANEXO I**



Tabela I. 1 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para a N105

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N105	Betão Betuminoso (BB)	Pele de crocodilo	34	2.3	95.02	95.08	86.80	87.49	87.71	88.35	55.18	57.14	0.25	0.34	1.14	1.17	3.84	4.06
					95.13		88.17		88.99		59.10		0.42		1.20		4.28	
		Desagregação	31	1.3	91.50	91.61	83.78	84.46	85.06	85.77	45.48	47.25	0.11	0.17	1.15	1.19	3.53	3.73
					91.71		85.14		86.48		49.02		0.22		1.22		3.92	
		Pele de crocodilo	50	2.1	99.56	100.12	92.76	93.54	94.31	95.18	72.03	75.02	0.43	0.45	1.15	1.17	4.41	4.60
					100.68		94.32		96.05		78.01		0.46		1.19		4.79	
		Desagregação	45	1.2	98.79	99.16	90.65	91.22	93.79	94.35	67.77	69.59	0.27	0.32	1.18	1.20	4.42	4.57
					99.52		91.78		94.91		71.41		0.36		1.22		4.72	
		Pele de crocodilo	60	1.9	100.17	100.82	93.38	93.89	94.26	94.87	75.31	76.33	0.20	0.22	1.18	1.19	4.64	4.71
					101.46		94.39		95.48		77.35		0.23		1.20		4.78	
		Desagregação	56	1.1	101.29	101.41	93.60	93.75	94.47	94.65	77.81	77.48	0.21	0.20	1.18	1.20	4.76	4.81
					101.53		93.90		94.82		77.15		0.18		1.21		4.85	
Nenhuma	30	1	93.44	93.34	84.91	85.10	86.63	85.96	50.72	50.82	0.10	0.11	1.18	1.19	3.95	3.97		
			93.24		85.29		85.29		50.91		0.12		1.20		3.98			
Nenhuma	50	1	102.11	102.62	91.77	92.33	92.50	93.01	73.49	74.15	0.17	0.17	1.18	1.20	4.67	4.54		
			103.13		92.88		93.52		74.80		0.17		1.21		4.41			
Nenhuma	61	1	102.18	102.89	93.70	93.97	94.03	94.29	82.17	81.41	0.22	0.22	1.20	1.21	5.05	5.06		
			103.60		94.23		94.55		80.64		0.21		1.22		5.06			

Tabela I. 2 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o primeiro trecho da N206

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N206_1	Betão betuminoso (BB)	Fendilhamento	31	1.6	96.70	97.46	86.91	87.64	87.59	88.35	55.37	57.40	0.14	0.13	1.14	1.15	3.90	4.00
					98.21		88.37		89.11		59.43		0.12		1.16		4.10	
		Fendilhamento	31	1.6	97.08	97.36	87.90	88.32	88.54	88.97	57.43	58.36	0.20	0.20	1.13	1.14	3.81	3.88
					97.64		88.74		89.39		59.28		0.20		1.14		3.95	
		Desagregação	32	1.8	105.11	104.67	97.29	97.02	98.34	98.12	96.89	94.90	0.20	0.19	1.16	1.17	5.29	5.26
					104.23		96.74		97.90		92.90		0.18		1.17		5.23	
		Desagregação	31	1.8	102.87	103.43	95.50	96.18	96.32	97.00	85.29	87.98	0.16	0.16	1.17	1.18	4.93	5.06
					103.99		96.86		97.68		90.67		0.15		1.19		5.19	
		Fendilhamento	52	1.5	104.59	104.31	95.53	95.04	96.07	95.70	86.56	82.91	0.24	0.23	1.14	1.16	4.82	4.77
					104.02		94.55		95.33		79.26		0.22		1.17		4.72	
		Fendilhamento	51	1.5	103.64	104.17	96.32	96.95	96.32	97.35	88.22	90.26	0.27	0.28	1.15	1.17	4.92	5.05
					104.69		97.58		98.37		92.29		0.29		1.18		5.17	
Desagregação	50	1.6	92.33	92.35	85.50	85.65	86.28	86.44	48.91	48.60	0.13	0.13	1.18	1.20	3.73	3.78		
			92.37		85.80		86.60		48.28		0.12		1.22		3.82			
Desagregação	49	1.6	94.20	93.81	87.28	87.20	87.93	87.88	53.58	52.64	0.17	0.16	1.19	1.21	3.91	3.92		
			93.41		87.11		87.83		51.69		0.14		1.22		3.93			
Fendilhamento	63	1.4	99.22	98.38	92.74	91.90	93.43	92.59	72.73	69.50	0.24	0.23	1.17	1.17	4.49	4.38		
			97.54		91.06		91.75		66.27		0.22		1.17		4.27			
Fendilhamento	62	1.4	100.37	100.64	92.99	93.35	92.99	93.35	75.76	75.72	0.21	0.22	1.15	1.17	4.57	4.64		
			100.90		93.71		93.71		75.68		0.22		1.19		4.70			
Desagregação	63	1.5	104.36	103.95	97.22	96.92	97.94	97.63	93.92	90.90	0.22	0.21	1.19	1.21	5.38	5.35		
			103.54		96.62		97.32		87.88		0.19		1.23		5.32			

Tabela I. 3 (continuação) – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o primeiro trecho da N206

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
		Desagregação	64	1.5	105.91	106.54	98.43	98.98	99.59	100.18	101.90	102.97	0.22	0.21	1.19	1.22	5.66	5.81
					107.16		99.52		100.76		104.03		0.20		1.24		5.96	

Tabela I. 4 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o segundo trecho da N206

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N206_2	Betão betuminoso (BB)	Pele de crocodilo	30	1.8	93.15	93.40	84.22	84.59	85.05	85.52	48.12	48.70	0.11	0.11	1.22	1.23	3.96	3.99
					93.65		84.96		85.98		49.27		0.11		1.23		4.02	
		Pele de crocodilo	32	1.8	98.57	97.93	90.59	90.18	91.81	91.46	64.85	63.18	0.15	0.21	1.16	1.18	4.25	4.27
					97.29		89.76		91.10		61.50		0.27		1.19		4.28	
		Pele de crocodilo	51	1.5	99.36	98.94	92.41	92.02	93.48	93.21	71.82	69.63	0.18	0.24	1.16	1.18	4.44	4.45
					98.52		91.63		92.93		67.43		0.30		1.19		4.46	
		Pele de crocodilo	52	1.5	102.46	102.25	93.97	93.81	95.00	94.77	80.65	78.42	0.27	0.23	1.18	1.20	4.90	4.87
					102.04		93.64		94.53		76.19		0.18		1.21		4.84	
		Pele de crocodilo	51	1.5	101.05	100.70	93.99	93.59	95.16	94.69	77.94	75.41	0.23	0.22	1.16	1.18	4.67	4.64
					100.34		93.19		94.22		72.87		0.21		1.19		4.61	
		Pele de crocodilo	60	1.3	102.22	103.37	95.89	96.37	96.67	97.26	85.00	86.15	0.21	0.22	1.17	1.18	4.92	5.02
					104.51		96.84		97.85		87.30		0.23		1.19		5.11	
Pele de crocodilo	62	1.3	105.97	106.54	97.99	97.91	98.71	98.61	98.00	96.13	0.26	0.29	1.15	1.17	5.30	5.30		
			107.11		97.83		98.51		94.25		0.31		1.18		5.30			

Tabela I. 5 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para a N207-4

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N207-4	Betão betuminoso (BB)	Pele de crocodilo	30	1	97.11	95.81	85.52	86.06	86.75	87.25	53.60	53.70	0.47	0.35	1.17	1.19	4.07	4.08
					94.51		86.60		87.74		53.80		0.23		1.20		4.08	
		Pele de crocodilo	32	1	94.04	94.36	86.25	86.36	87.12	87.17	52.56	52.67	0.22	0.24	1.18	1.19	3.94	3.99
					94.68		86.46		87.21		52.77		0.25		1.20		4.03	
		Pele de crocodilo	50	0.9	100.35	100.88	92.87	93.17	93.52	93.94	75.26	76.01	0.24	0.26	1.20	1.21	4.78	4.86
					101.41		93.46		94.36		76.76		0.27		1.22		4.94	
		Pele de crocodilo	50	0.9	99.54	98.68	91.19	90.64	92.34	91.73	69.43	66.77	0.21	0.21	1.19	1.21	4.58	4.54
					97.81		90.09		91.12		64.11		0.20		1.22		4.50	
		Pele de crocodilo	60	0.9	105.12	104.69	97.57	96.84	98.48	97.73	97.92	93.57	0.31	0.34	1.21	1.22	5.63	5.53
					104.26		96.10		96.97		89.22		0.36		1.23		5.43	
		Pele de crocodilo	60	0.9	103.70	103.32	96.56	96.23	97.39	97.04	91.87	89.57	0.31	0.26	1.21	1.23	5.46	5.44
					102.93		95.90		96.69		87.27		0.21		1.24		5.41	
		Pele de crocodilo	65	0.9	105.26	104.62	96.50	95.90	97.28	96.69	94.28	90.40	0.24	0.23	1.21	1.22	5.53	5.44
					103.97		95.29		96.10		86.52		0.22		1.23		5.35	
Nenhuma	49	0.9	98.45	97.46	87.60	86.87	87.99	87.28	59.04	55.91	0.17	0.15	1.21	1.22	4.33	4.26		
			96.46		86.14		86.57		52.77		0.13		1.23		4.18			

Tabela I. 6 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o primeiro trecho da N14

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N14_1	Pavimento modificado com borracha (MBMB)	Fendilhamento	30	1.6	98.23	93.69	90.05	86.47	90.70	87.18	62.83	51.33	0.21	0.16	1.16	1.17	4.16	3.73
					89.14		82.88		83.65		39.83		0.10		1.17		3.30	
		Fendilhamento	32	1.6	99.98	98.74	87.73	87.46	88.38	88.16	57.05	54.56	0.54	0.35	1.12	1.14	3.89	3.82
					97.49		87.19		87.93		52.07		0.16		1.15		3.75	
		Fendilhamento	48	1.5	101.02	99.93	93.79	93.52	94.73	94.50	76.23	74.14	0.20	0.18	1.21	1.22	4.84	4.76
					98.84		93.25		94.26		72.04		0.16		1.22		4.67	
		Fendilhamento	47	1.5	98.34	97.82	92.28	92.24	92.78	92.71	68.33	67.32	0.18	0.17	1.18	1.18	4.37	4.31
					97.29		92.20		92.63		66.31		0.15		1.18		4.25	
		Fendilhamento	63	1.5	104.99	105.25	97.38	98.09	98.12	98.89	93.11	95.05	0.29	0.27	1.19	1.20	5.32	5.40
					105.51		98.80		99.65		96.99		0.24		1.21		5.48	
		Fendilhamento	61	1.5	102.49	101.43	95.68	95.33	95.90	95.65	83.98	81.25	0.39	0.31	1.21	1.21	5.11	4.97
					100.36		94.98		95.39		78.52		0.22		1.21		4.82	
Nenhuma	30	1.3	98.76	96.19	84.66	85.91	85.40	86.65	50.55	52.50	0.39	0.25	1.14	1.16	3.76	3.87		
			93.61		87.15		87.89		54.44		0.10		1.18		3.98			
Nenhuma	49	1.3	99.90	99.02	91.45	91.11	92.04	91.77	68.50	65.92	0.18	0.16	1.17	1.18	4.37	4.30		
			98.14		90.76		91.50		63.33		0.14		1.19		4.23			
Nenhuma	62	1.2	106.19	105.67	97.32	96.68	97.75	97.09	95.64	90.93	0.23	0.22	1.18	1.19	5.35	5.20		
			105.15		96.04		96.42		86.22		0.21		1.19		5.05			

Tabela I. 7 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o segundo trecho da N14

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N14_2	Pavimento modificado com borracha (MBMB)	Desagregação	30	2.2	103.30	98.84	88.97	87.27	89.72	88.05	62.93	56.68	0.46	0.41	1.08	1.12	3.92	3.84
					94.38		85.56		86.38		50.42		0.35		1.15		3.76	
		Desagregação	30	2.2	104.10	100.38	90.18	89.01	91.09	89.71	67.76	62.50	0.56	0.48	1.08	1.12	4.06	4.04
					96.66		87.83		88.32		57.24		0.39		1.15		4.02	
		Desagregação	47	2.1	105.04	102.65	93.92	93.21	94.51	93.82	78.29	73.62	0.43	0.34	1.12	1.13	4.52	4.37
					100.25		92.49		93.13		68.94		0.24		1.14		4.22	
		Desagregação	48	2.1	106.56	104.86	95.38	95.30	95.84	95.82	86.02	83.06	0.40	0.31	1.12	1.15	4.76	4.72
					103.15		95.21		95.79		80.09		0.21		1.17		4.67	
		Desagregação	55	2	106.32	103.69	96.73	95.08	97.29	95.61	91.41	81.89	0.38	0.31	1.14	1.15	5.00	4.69
					101.06		93.43		93.92		72.36		0.23		1.15		4.37	
		Desagregação	58	2	106.73	104.04	97.10	95.88	98.63	97.53	93.54	85.44	0.41	0.32	1.15	1.16	5.13	4.86
					101.35		94.66		96.42		77.34		0.22		1.16		4.59	
Desagregação	65	2	105.89	105.61	97.37	97.61	98.46	98.82	94.91	93.65	0.32	0.28	1.15	1.16	5.20	5.16		
			105.33		97.85		99.18		92.39		0.23		1.17		5.12			

Tabela I. 8 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o primeiro trecho da N103

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N103_1	Pavimento modificado com borracha (MBMB)	Fendilhamento	32	1.1	89.19	90.02	82.77	83.67	83.18	83.99	41.39	43.92	0.09	0.10	1.16	1.17	3.38	3.50
					90.84		84.56		84.79		46.44		0.11		1.17		3.62	
		Fendilhamento	32	1.1	91.47	91.94	84.57	84.34	85.33	85.06	46.04	45.97	0.12	0.12	1.16	1.16	3.56	3.58
					92.40		84.10		84.78		45.89		0.12		1.16		3.60	
		Fendilhamento	51	1	100.42	100.06	94.24	93.55	94.92	94.19	76.78	74.74	0.20	0.19	1.21	1.21	4.80	4.74
					99.69		92.85		93.46		72.69		0.18		1.20		4.67	
		Fendilhamento	51	1	102.66	100.83	93.98	92.22	94.61	92.85	78.16	71.65	0.17	0.18	1.17	1.17	4.67	4.47
					98.99		90.45		91.08		65.14		0.18		1.17		4.27	
		Fendilhamento	65	1	106.37	106.47	98.62	98.48	98.99	98.86	99.31	99.89	0.23	0.23	1.19	1.19	5.51	5.50
					106.57		98.33		98.73		100.47		0.23		1.18		5.49	
		Fendilhamento	65	1	104.75	104.02	97.10	95.96	97.41	96.28	91.79	88.08	0.19	0.20	1.20	1.19	5.33	5.17
					103.28		94.82		95.15		84.37		0.21		1.18		5.00	
Nenhuma	31	1.1	95.69	94.71	86.79	84.45	87.09	84.75	52.36	47.16	0.10	0.10	1.18	1.17	3.88	3.65		
			93.73		82.11		82.41		41.95		0.10		1.15		3.41			
Nenhuma	50	1	104.33	103.62	92.02	90.86	92.30	91.12	72.54	69.99	0.18	0.20	1.18	1.16	4.63	4.48		
			102.91		89.69		89.94		67.43		0.21		1.14		4.32			
Nenhuma	61	1	105.35	105.71	93.43	94.14	94.41	95.31	78.77	83.50	0.19	0.23	1.19	1.18	4.92	5.02		
			106.07		94.84		96.21		88.22		0.26		1.17		5.11			

Tabela I. 9 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o segundo trecho da N103

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N103_2	Pavimento modificado com borracha (MBMB)	Pele de crocodilo	30	1.8	95.32	95.64	86.74	86.89	88.23	88.42	54.14	54.97	0.22	0.20	1.13	1.14	3.80	3.87
					95.95		87.03		88.61		55.80		0.17		1.15		3.93	
		Pele de crocodilo	33	1.8	103.04	101.88	89.98	88.83	90.66	89.45	63.38	60.88	0.21	0.19	1.11	1.11	3.98	3.91
					100.71		87.67		88.24		58.38		0.17		1.11		3.84	
		Desagregação	30	1.8	96.46	96.56	88.13	88.06	88.56	88.47	57.34	57.68	0.20	0.19	1.11	1.11	3.76	3.78
					96.65		87.98		88.38		58.02		0.17		1.11		3.79	
		Pele de crocodilo	48	1.7	103.00	101.09	96.01	93.62	96.79	94.49	86.94	77.78	0.32	0.26	1.17	1.17	5.04	4.71
					99.17		91.22		92.18		68.61		0.19		1.17		4.38	
		Pele de crocodilo	52	1.7	101.81	101.81	93.54	93.34	94.19	93.93	74.02	74.27	0.17	0.18	1.15	1.15	4.47	4.49
					101.80		93.14		93.66		74.51		0.18		1.15		4.50	
		Desagregação	48	1.7	97.98	97.46	91.90	91.41	92.18	91.77	67.93	66.87	0.15	0.15	1.14	1.14	4.16	4.15
					96.94		90.91		91.36		65.81		0.14		1.14		4.13	
		Pele de crocodilo	65	1.6	103.72	103.15	95.10	94.54	95.65	95.08	82.43	81.34	0.20	0.21	1.17	1.17	4.84	4.81
					102.58		93.97		94.51		80.25		0.21		1.16		4.77	
		Pele de crocodilo	64	1.6	108.19	108.24	97.24	97.44	98.38	98.59	95.00	98.76	0.21	0.25	1.20	1.19	5.44	5.56
					108.29		97.63		98.80		102.51		0.28		1.18		5.67	
Desagregação	65	1.6	101.39	100.73	96.40	95.51	97.48	96.53	85.45	81.86	0.16	0.16	1.19	1.19	4.99	4.89		
			100.06		94.62		95.58		78.26		0.16		1.19		4.79			

Tabela I. 10 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o primeiro trecho da N310

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N310_1	Microbetão (MBB)	Fendilhamento	32	1.4	92.67	92.65	82.49	84.68	82.97	85.12	41.91	47.35	0.19	0.27	1.13	1.17	3.35	3.68
					92.62		86.86		87.26		52.78		0.34		1.20		4.00	
		Pele de crocodilo c/ ninhos	33	1.4	91.64	90.90	80.52	81.36	80.93	81.84	38.74	40.10	0.19	0.23	1.13	1.16	3.26	3.41
					90.16		82.20		82.75		41.46		0.27		1.19		3.55	
		Pele de crocodilo c/ ninhos	32	1.4	94.71	94.39	86.82	86.57	87.66	87.40	52.48	51.98	0.28	0.38	1.13	1.16	3.72	3.84
					94.06		86.32		87.14		51.48		0.47		1.19		3.95	
		Fendilhamento	50	1.4	101.17	100.55	93.46	93.18	93.93	93.63	73.79	71.82	0.15	0.17	1.18	1.20	4.53	4.53
					99.93		92.89		93.33		69.84		0.18		1.21		4.52	
		Fendilhamento	50	1.4	101.25	99.80	92.15	91.79	92.72	92.35	69.76	67.61	0.20	0.23	1.17	1.19	4.41	4.41
					98.34		91.43		91.98		65.45		0.25		1.21		4.40	
		Pele de crocodilo c/ ninhos	53	1.4	100.86	100.44	92.65	92.83	93.51	93.73	72.15	71.89	0.21	0.24	1.16	1.19	4.44	4.52
					100.02		93.01		93.94		71.62		0.27		1.21		4.60	
Pele de crocodilo c/ ninhos	54	1.4	101.18	99.95	91.76	91.81	92.91	92.95	67.60	67.33	0.20	0.25	1.17	1.19	4.30	4.36		
			98.71		91.86		92.99		67.06		0.30		1.20		4.42			
Fendilhamento	62	1.4	104.27	104.27	96.68	97.11	97.48	97.86	88.86	89.83	0.23	0.25	1.17	1.19	5.03	5.13		
			104.27		97.54		98.24		90.80		0.27		1.20		5.22			
Fendilhamento	64	1.4	103.33	103.09	97.15	96.90	97.86	97.53	88.52	86.80	0.21	0.23	1.19	1.20	5.08	5.06		
			102.84		96.64		97.20		85.07		0.25		1.21		5.04			
Pele de crocodilo c/ ninhos	66	1.4	104.70	104.63	96.55	96.78	97.27	97.48	90.02	90.05	0.27	0.32	1.15	1.17	4.98	5.06		
			104.55		97.00		97.69		90.07		0.36		1.18		5.14			
Pele de crocodilo c/ ninhos	64	1.4	104.28	103.87	96.40	96.36	97.71	97.62	89.06	87.38	0.29	0.32	1.17	1.19	5.06	5.06		
			103.45		96.32		97.53		85.69		0.35		1.20		5.06			

Tabela I. 11 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o segundo trecho da N310

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N310_2	Microbetão (MBB)	Pele de crocodilo	32	1.6	97.06	95.69	88.19	87.45	88.70	87.97	58.85	56.62	0.16	0.29	1.13	1.17	3.95	4.04
					94.32		86.71		87.23		54.38		0.42		1.20		4.12	
		Pele de crocodilo	35	1.6	97.33	96.35	86.60	86.13	87.80	87.30	53.80	52.23	0.21	0.30	1.13	1.17	3.77	3.87
					95.36		85.65		86.79		50.66		0.39		1.20		3.97	
		Pele de crocodilo	49	1.5	100.35	99.67	92.56	92.28	93.10	92.75	72.32	70.50	0.24	0.29	1.15	1.17	4.44	4.45
					98.99		92.00		92.40		68.68		0.33		1.19		4.45	
		Pele de crocodilo	49	1.5	101.57	101.11	93.54	93.12	94.36	93.85	75.69	73.46	0.24	0.28	1.16	1.18	4.56	4.58
					100.64		92.70		93.34		71.22		0.32		1.20		4.59	
		Pele de crocodilo	64	1.4	105.96	104.97	96.63	95.90	97.47	96.75	93.90	87.91	0.22	0.21	1.20	1.21	5.43	5.25
					103.98		95.17		96.02		81.91		0.20		1.22		5.07	
		Pele de crocodilo	62	1.4	104.39	104.36	95.10	95.42	96.02	96.31	85.59	85.76	0.31	0.31	1.16	1.18	4.94	4.99
					104.33		95.74		96.60		85.92		0.30		1.19		5.03	

Tabela I. 12 – Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o terceiro trecho da N310

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
N310_3	Microbetão	Fendilhamento	33	1.1	93.94	93.57	82.27	82.11	82.85	82.40	42.04	41.39	0.14	0.13	1.14	1.14	3.39	3.33
					93.20		81.94		81.94		40.73		0.11		1.13		3.26	
		Fendilhamento	30	1.1	95.37	95.13	81.78	82.38	82.54	83.13	42.32	43.76	0.13	0.19	1.13	1.16	3.40	3.56
					94.88		82.98		83.72		45.19		0.25		1.18		3.72	
		Desagregação	32	1.4	91.69	92.21	80.93	81.66	81.42	82.08	40.60	42.40	0.12	0.23	1.11	1.15	3.26	3.50
					92.72		82.39		82.74		44.19		0.33		1.19		3.73	
		Desagregação	31	1.4	94.84	94.72	85.09	85.28	85.57	85.68	51.06	51.74	0.11	0.25	1.13	1.17	3.69	3.91
					94.60		85.47		85.78		52.42		0.38		1.21		4.12	
		Fendilhamento	44	1.1	98.05	97.75	91.01	90.92	91.47	91.48	66.74	65.83	0.16	0.22	1.15	1.17	4.22	4.28
					97.44		90.83		91.48		64.92		0.27		1.19		4.33	
		Fendilhamento	50	1.1	97.68	98.50	88.63	89.58	89.38	90.39	58.67	61.39	0.15	0.18	1.14	1.16	3.90	4.06
					99.31		90.53		91.39		64.11		0.21		1.17		4.22	
Desagregação	51	1.3	101.72	101.14	92.75	92.47	93.39	93.11	72.93	71.25	0.15	0.20	1.14	1.16	4.38	4.40		
			100.56		92.18		92.83		69.56		0.24		1.17		4.41			
Desagregação	49	1.3	99.71	99.61	89.65	89.62	89.94	89.97	65.10	63.74	0.16	0.18	1.14	1.16	4.21	4.24		
			99.51		89.58		89.99		62.37		0.20		1.18		4.27			
Fendilhamento	63	1.1	102.96	103.71	93.95	94.37	94.82	95.39	79.83	80.10	0.18	0.18	1.16	1.17	4.73	4.76		
			104.45		94.78		95.96		80.36		0.17		1.17		4.78			
Fendilhamento	65	1.1	103.99	105.15	95.01	95.68	95.78	96.38	85.41	87.38	0.19	0.20	1.17	1.18	4.94	5.04		
			106.31		96.34		96.97		89.35		0.21		1.18		5.14			
Desagregação	64	1.3	104.12	103.39	94.23	93.50	94.82	94.09	81.72	78.56	0.20	0.19	1.15	1.15	4.75	4.65		
			102.66		92.77		93.36		75.39		0.18		1.15		4.54			

Tabela I. 13 (continuação) - Valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos, retirados da aplicação PsySound3, para o terceiro trecho da N310

Tipo de pavimento		Patologia	Velocidade (km/h)	MPD (mm)	Leq (dB)		LAeq (dB(A))		Lamax (dB(A))		Loudness (Sones)		Roughness (aspers)		Sharpness CF (acum)		Sharpness MG (acum)	
		Desagregação	63	1.3	104.89	104.75	95.38	95.61	96.27	94.32	87.36	86.95	0.20	0.22	1.15	1.16	4.95	4.95
					104.61		95.83		92.37		86.54		0.23		1.17		4.95	
		Nenhuma	31	1	90.09	90.60	79.31	80.01	79.70	80.45	35.69	37.15	0.11	0.19	1.12	1.16	3.10	3.29
					91.11		80.70		81.20		38.60		0.26		1.19		3.48	
		Nenhuma	49	1	101.65	100.02	90.73	89.44	91.39	90.02	67.77	62.77	0.14	0.15	1.13	1.15	4.19	4.11
					98.39		88.15		88.64		57.76		0.16		1.16		4.02	
		Nenhuma	63	1	106.13	105.66	98.09	97.50	98.83	98.31	98.00	94.06	0.18	0.20	1.19	1.19	5.47	5.34
					105.19		96.90		97.79		90.12		0.21		1.19		5.20	

## **ANEXO II**



Tabela II. 1 – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada

			LAeq	LAmáx	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
Vel. Todas	Método	Método	SVM	SVM	SVM	KNN	KNN	SVM
		COR	0.913	0.914	0.876	0.905	0.891	<b>0.434</b>
		MAD	1.445	1.461	1.601	5.454	0.210	0.056
		ERA	36.442	36.584	42.782	39.204	41.837	86.844
		RMSE	1.923	1.942	2.166	7.034	0.272	0.080
	Importâncias	Tipo de pavimento	0.003	0.014	0.014	0.030	0.047	0.183
		Patologias	0.261	0.444	0.247	0.392	0.410	0.126
		Textura	0.030	0.081	0.018	0.014	0.003	0.519
		Velocidade	0.706	0.461	0.720	0.564	0.540	0.172
<hr/>								
Vel. 30	Método	Método	SVM	SVM	NN	SVM	KNN	SVM
		COR	0.808	0.845	0.717	0.827	0.714	<b>0.198</b>
		MAD	1.540	1.528	1.902	4.444	0.222	0.096
		ERA	57.533	55.702	64.316	54.916	76.670	100.033
		RMSE	2.205	2.071	2.821	6.647	0.305	0.128
	Importâncias	Tipo de pavimento	0.005	0.008	0.169	0.003	0.453	0.364
		Patologias	0.343	0.174	0.439	0.357	0.247	0.219
		Textura	0.651	0.793	0.253	0.639	0.119	0.210
		Velocidade	0.001	0.026	0.139	0.001	0.181	0.207
<hr/>								
Vel. 50	Método	Método	SVM	SVM	NN	SVM	SVM	KNN
		COR	0.761	0.774	0.718	0.679	0.615	0.524
		MAD	1.223	1.200	1.601	5.087	0.187	0.050
		ERA	67.657	64.186	76.986	78.038	82.270	85.187
		RMSE	1.604	1.599	2.086	6.738	0.239	0.066
	Importâncias	Tipo de pavimento	0.004	0.001	0.399	0.018	0.005	0.058
		Patologias	0.877	0.832	0.350	0.807	0.111	0.188
		Textura	0.047	0.066	0.140	0.078	0.705	0.667
		Velocidade	0.072	0.101	0.112	0.097	0.179	0.087
<hr/>								
Vel. 65	Método	Método	SVM	SVM	SVM	SVM	SVM	KNN
		COR	0.715	0.698	0.690	0.637	0.754	<b>0.377</b>
		MAD	1.023	1.135	1.243	4.976	0.171	0.039
		ERA	72.372	73.696	75.050	78.330	67.206	94.284
		RMSE	1.222	1.380	1.598	6.357	0.215	0.052
	Importâncias	Tipo de pavimento	0.177	0.117	0.120	0.122	0.104	0.191
		Patologias	0.600	0.661	0.632	0.600	0.789	0.277

Tabela II. 2 (continuação) – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada

			LAeq	LAmaz	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
		Textura	0.091	0.021	0.120	0.052	0.032	0.266
		Velocidade	0.132	0.202	0.128	0.226	0.075	0.267

Tabela II. 3 – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando o tipo de pavimento, patologias e velocidade como variáveis de entrada

			LAeq	LAmaz	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
Vel. Todas	Método	Método	NN	SVM	SVM	SVM	SVM	SVM
		COR	0.8807	0.8692	0.7862	0.8559	0.8458	<b>0.1746</b>
		MAD	1.6281	1.7040	2.0370	6.2583	0.2380	0.0608
		ERA	41.0658	42.6563	54.4393	44.9854	47.4264	94.2552
		RMSE	2.2803	2.3626	2.7833	8.5537	0.3209	0.0883
	Importâncias	Tipo de pavimento	5.54%	0.20%	2.21%	0.45%	1.66%	1.69%
		Patologias	68.53%	52.21%	41.93%	40.66%	15.46%	59.00%
Velocidade		25.93%	47.59%	55.87%	58.89%	82.88%	39.30%	
Vel. 30	Método	Método	KNN	KNN	SVM	KNN	KNN	RT
		COR	0.5603	0.6018	<b>0.2859</b>	0.5814	0.5230	<b>0.1690</b>
		MAD	2.2776	2.3713	2.6873	6.7285	0.2723	0.0961
		ERA	85.1117	86.4692	90.8690	83.1445	93.8761	100.4673
		RMSE	3.1226	3.1425	4.0399	9.9983	0.3726	0.1229
	Importâncias	Tipo de pavimento	0.64%	7.23%	0.27%	1.91%	13.37%	26.622%
		Patologias	84.27%	80.96%	93.93%	85.85%	84.33%	73.378%
Velocidade		15.09%	11.81%	5.80%	12.24%	2.30%	0.000%	
Vel. 50	Método	Método	KNN	NN	NN	KNN	KNN	KNN
		COR	0.6925	0.7093	0.6426	0.6293	0.5768	<b>0.3818</b>
		MAD	1.4151	1.3591	1.7005	5.4360	0.1915	0.0543
		ERA	78.2814	72.7002	81.7677	83.4007	84.2586	92.4057
		RMSE	1.7840	1.8898	2.3080	7.0175	0.2426	0.0732
	Importâncias	Tipo de pavimento	1.14%	9.76%	0.17%	2.83%	2.52%	21.56%
		Patologias	95.22%	79.10%	99.33%	93.81%	84.44%	58.40%
Velocidade		3.63%	11.14%	0.50%	3.35%	13.04%	20.04%	
Vel. 65	Método	Método	SVM	SVM	NN	SVM	SVM	SVM
		COR	0.5407	0.6758	0.5155	0.5318	0.6036	<b>0.2391</b>
		MAD	1.1941	1.1708	1.5198	5.6079	0.2112	0.0385

Tabela II. 4 (continuação) – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando o tipo de pavimento, patologias e velocidade como variáveis de entrada

			LAeq	LAmaz	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
		ERA	84.4544	76.0166	91.7590	88.2758	83.0509	93.3771
		RMSE	1.4647	1.4283	1.9955	6.9812	0.2627	0.0540
	Importâncias	Tipo de pavimento	6.68%	26.91%	33.71%	11.44%	4.40%	11.29%
		Patologias	86.71%	56.33%	37.36%	76.61%	91.70%	65.58%
		Velocidade	6.61%	16.76%	28.93%	11.96%	3.91%	23.13%

Tabela II. 5 – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando o tipo de pavimento, patologias e textura como variáveis de entrada

			LAeq	LAmaz	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
Vel. Todas	Método	Método	NN	NN	SVM	NN	NN	RT
		COR	0.6375	0.6619	0.5985	0.6691	0.6537	<b>0.4997</b>
		MAD	2.5948	2.5617	2.7511	9.3058	0.3402	0.0559
		ERA	65.4462	64.1277	73.5240	66.8917	67.7858	86.7667
		RMSE	3.7844	3.6323	3.6045	12.5543	0.4676	0.0762
	Importâncias	Tipo de pavimento	2.01%	24.80%	30.39%	7.04%	13.43%	0.00%
		Patologias	72.28%	63.17%	14.15%	35.74%	67.11%	12.85%
		Textura	25.71%	12.03%	55.46%	57.22%	19.46%	87.15%
Vel. 30	Método	Método	NN	NN	NN	NN	SVM	SVM
		COR	0.7940	0.7969	0.6849	0.8468	0.7703	<b>0.3151</b>
		MAD	1.7569	1.8096	2.1047	4.9972	0.2116	0.0885
		ERA	65.6549	65.9869	71.1686	61.7506	72.9329	92.4720
		RMSE	2.3167	2.3919	2.9056	6.5566	0.2750	0.1214
	Importâncias	Tipo de pavimento	8.20%	41.06%	34.02%	20.29%	3.79%	35.20%
		Patologias	37.57%	22.71%	47.47%	43.95%	77.77%	21.40%
		Textura	54.22%	36.22%	18.51%	35.77%	18.44%	43.40%
Vel. 50	Método	Método	NN	NN	SVM	SVM	SVM	NN
		COR	0.7208	0.7420	0.7543	0.6596	0.6115	0.6168
		MAD	1.4171	1.3952	1.4983	5.4807	0.1875	0.0482
		ERA	78.3899	74.6296	72.0446	84.0852	82.4728	82.0778
		RMSE	1.7477	1.7494	1.8553	6.7767	0.2327	0.0624
	Importâncias	Tipo de pavimento	14.60%	51.58%	5.29%	15.70%	16.47%	7.74%
		Patologias	83.01%	33.83%	88.79%	3.28%	70.31%	34.62%
		Textura	2.40%	14.59%	5.92%	81.02%	13.22%	57.64%

Tabela II. 6 (continuação) – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando o tipo de pavimento, patologias e textura como variáveis de entrada

			LAeq	LAmaz	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
Vel. 65	Método	Método	NN	KNN	NN	KNN	NN	KNN
		COR	0.5980	0.6058	0.5560	<b>0.4587</b>	0.6140	<b>0.3763</b>
		MAD	1.1594	1.2229	1.4661	5.9765	0.2109	0.0401
		ERA	82.0015	79.3989	88.5197	94.0791	82.9444	97.1624
		RMSE	1.4363	1.5257	1.8444	7.1897	0.2665	0.0521
	Importâncias	Tipo de pavimento	6.72%	8.69%	0.54%	3.29%	1.95%	26.94%
		Patologias	71.44%	69.68%	55.18%	60.82%	44.28%	31.76%
		Textura	21.83%	21.63%	44.28%	35.89%	53.76%	41.30%

Tabela II. 7 – Melhores modelos e respectivas importâncias para os diferentes indicadores considerando as patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada

			LAeq	LAmaz	Leq	Loudness	Sharpness MG	Roughness
Vel. Todas	Método	Método	SVM	KNN	SVM	KNN	KNN	RT
		COR	0.9011	0.8974	0.8658	0.8993	0.8708	<b>0.4942</b>
		MAD	1.5525	1.6522	1.6780	5.6064	0.2281	0.0553
		ERA	39.1576	41.3605	44.8449	40.2997	45.4460	85.8293
		RMSE	2.0455	2.1217	2.2458	7.2749	0.2964	0.0771
	Importâncias	Patologias	42.76%	4.69%	10.16%	2.72%	3.11%	34.939%
		Textura	1.93%	4.49%	0.79%	2.85%	3.61%	57.849%
		Velocidade	55.31%	90.82%	89.05%	94.43%	93.28%	7.212%
Vel. 30	Método	Método	SVM	SVM	SVM	KNN	SVM	SVM
		COR	0.7997	0.8001	0.6914	0.8286	0.7285	<b>0.3621</b>
		MAD	1.5562	1.6868	1.9234	4.9542	0.2244	0.0839
		ERA	58.1541	61.5100	65.0370	61.2191	77.3664	87.6960
		RMSE	2.1888	2.3140	2.8635	6.8062	0.3014	0.1193
	Importâncias	Patologias	18.53%	16.87%	41.19%	49.82%	8.46%	73.30%
		Textura	53.69%	78.41%	26.57%	36.76%	65.50%	10.83%
		Velocidade	27.79%	4.72%	32.23%	13.41%	26.05%	15.87%
Vel. 50	Método	Método	SVM	SVM	SVM	NN	SVM	KNN
		COR	0.7800	0.7961	0.7272	0.6455	0.6148	0.5656
		MAD	1.1409	1.1333	1.5195	5.3583	0.1841	0.0488
		ERA	63.1138	60.6222	73.0646	82.2080	80.9837	83.0853
		RMSE	1.5444	1.5293	1.9594	7.1733	0.2395	0.0634
	Importâncias	Patologias	88.87%	30.49%	77.37%	53.55%	53.28%	26.14%
		Textura	6.35%	65.70%	0.30%	35.44%	9.14%	66.18%
		Velocidade	4.78%	3.82%	22.33%	11.02%	37.58%	7.68%



## **ANEXO III**

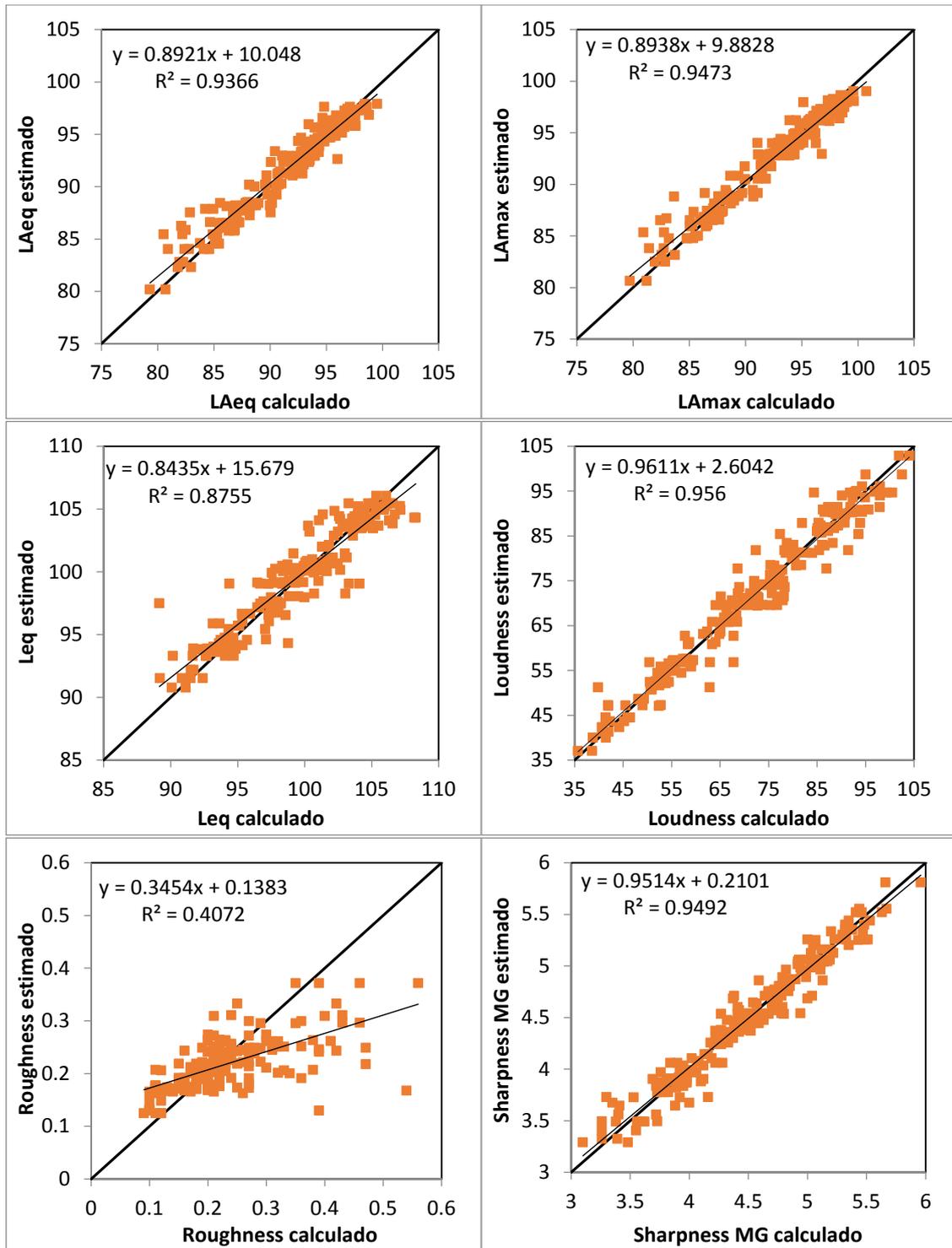


Figura III. 1 – Melhores modelos representados através de pontos de dispersão, para os diferentes indicadores, considerando o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada e as velocidades todas na base de dados

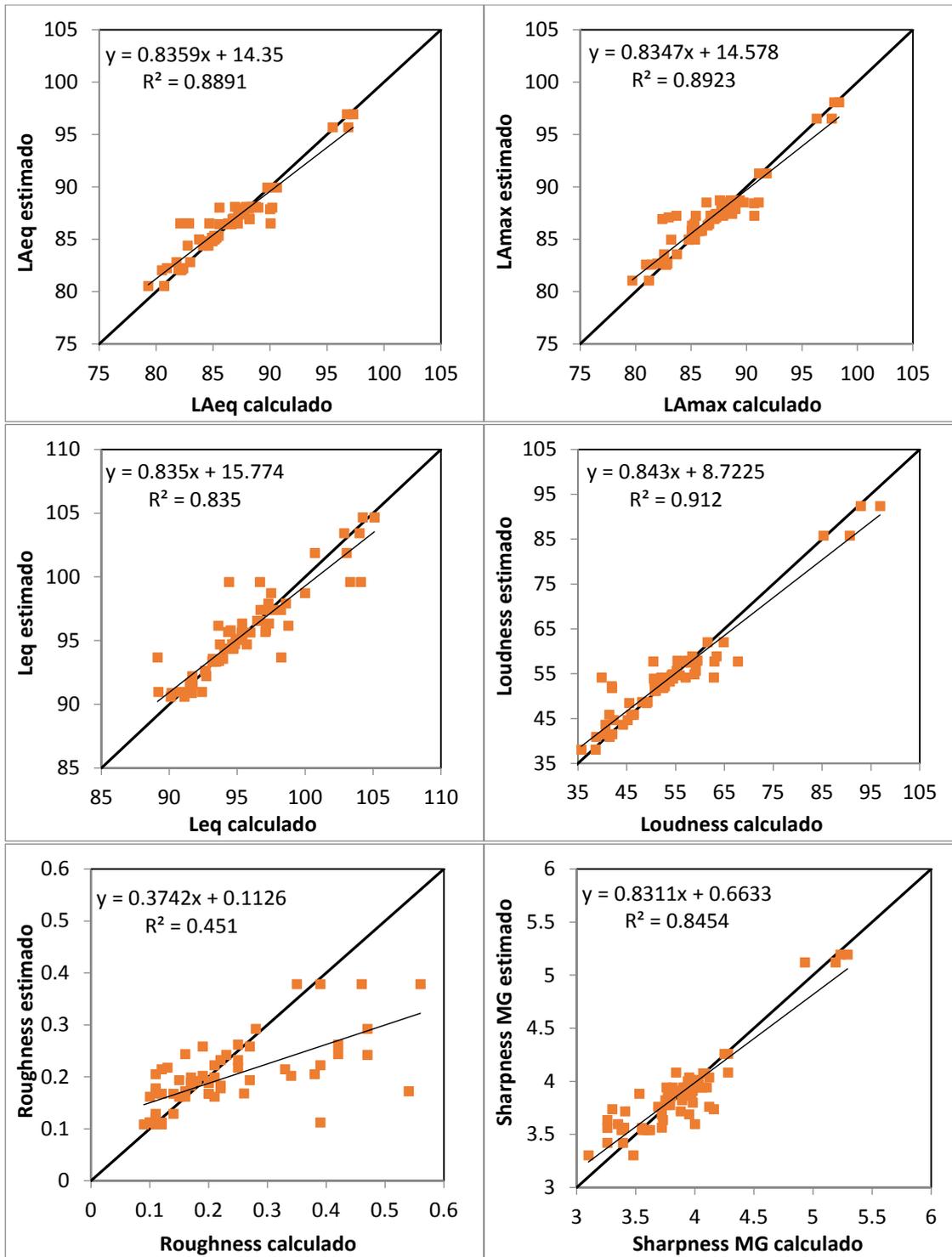


Figura III. 2 - Melhores modelos representados através de pontos de dispersão, para os diferentes indicadores, considerando o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada e a velocidade 30 km/h na base de dados

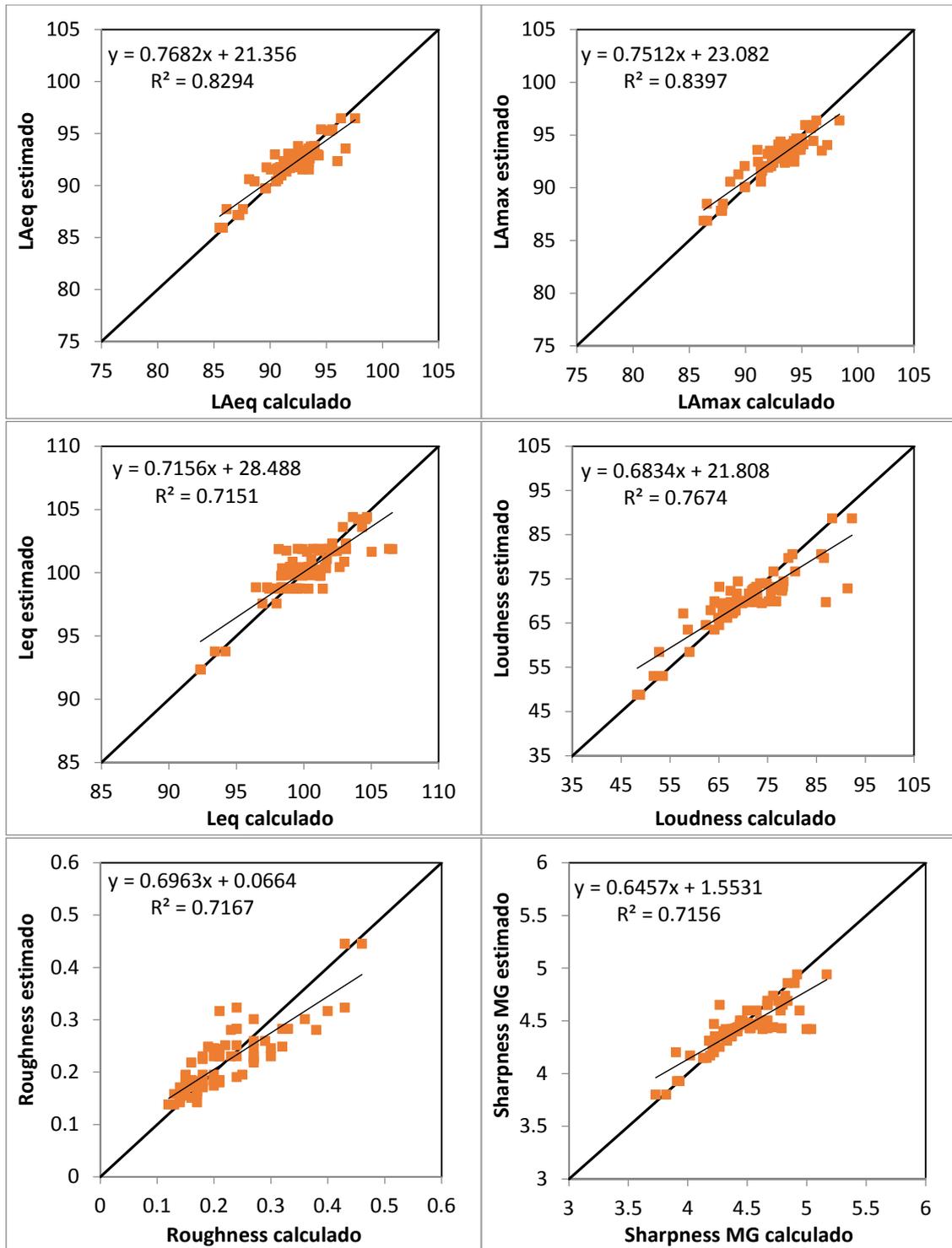


Figura III. 3 - Melhores modelos representados através de pontos de dispersão, para os diferentes indicadores, considerando o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada e a velocidade 50 km/h na base de dados

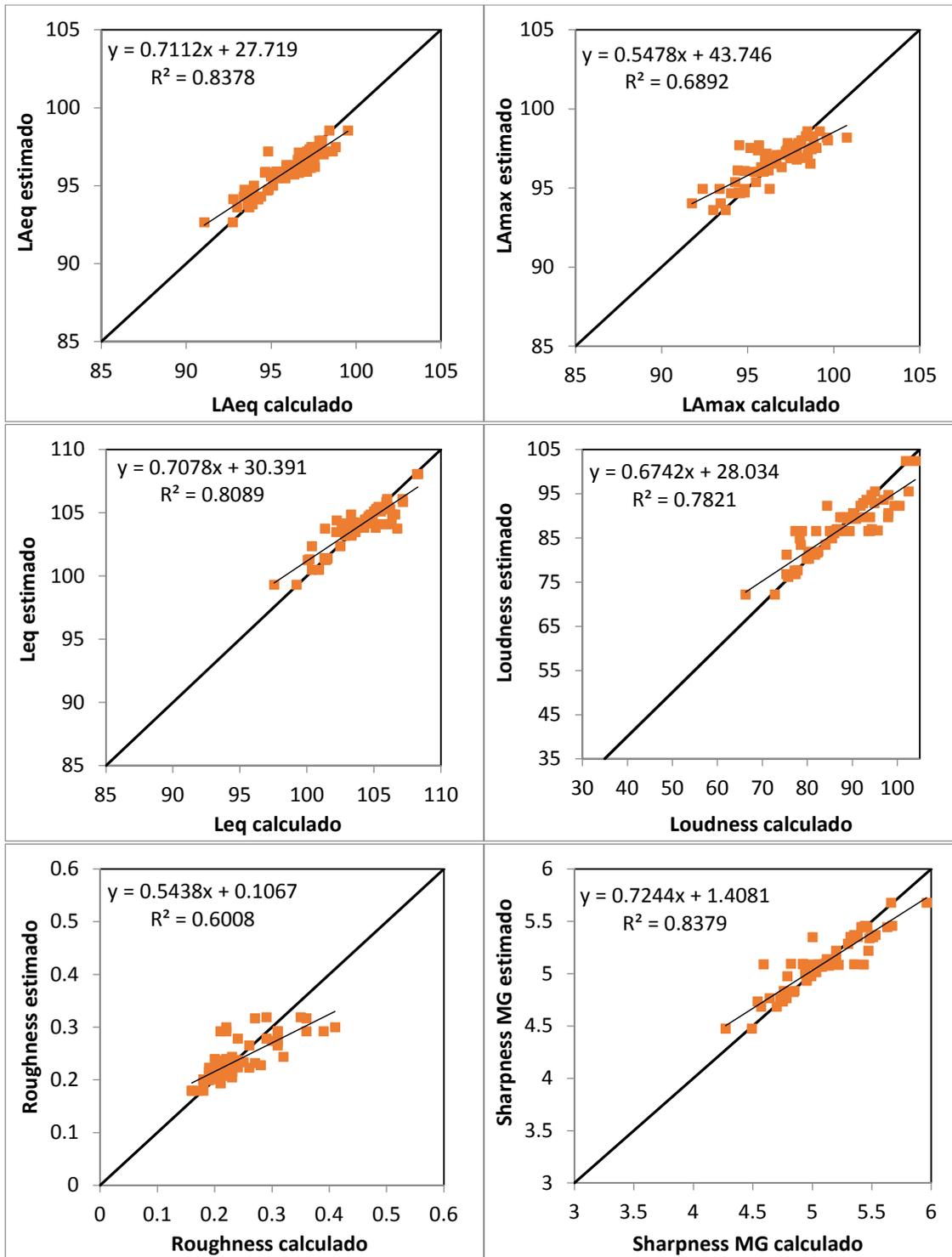


Figura III. 4 - Melhores modelos representados através de pontos de dispersão, para os diferentes indicadores, considerando o tipo de pavimento, patologias, textura e velocidade como variáveis de entrada e a velocidade 65 km/h na base de dados