

CLASSIFICAÇÃO DE PAVIMENTOS ATRAVÉS DE UMA ABORDAGEM PSICOACÚSTICA

Elisabete Freitas¹, Francisco Soares², João Lamas³, Carlos Silva⁴, Sandra Mouta⁵ e Jorge Santos⁶

¹ Doutorada, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800 058, Guimarães, Portugal

email: efreitas@civil.uminho.pt <http://www.civil.uminho.pt/departamento.php?sm=3>

² Mestre, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Campus de Azurém, 4800 058, Guimarães, Portugal

³ Mestre, Centro de Computação Gráfica, Domínio “Percepção, Interação e Usabilidade”, Campus de Azurém, 4800 058 Guimarães, Portugal

⁴ Mestre, Centro de Computação Gráfica, Domínio “Percepção, Interação e Usabilidade”, Campus de Azurém, 4800 058 Guimarães, Portugal

⁵ Doutorada, Centro de Computação Gráfica, Domínio “Percepção, Interação e Usabilidade”, Campus de Azurém, 4800 058 Guimarães, Portugal

⁶ Doutorada, Universidade do Minho, Departamento de Psicologia Básica, Centro Algoritmi, Centro de Computação Gráfica, Portugal, Campus de Azurém, 4800 058 Guimarães, Portugal

Sumário

O ruído rodoviário é um dos principais contribuintes para o ruído ambiente, o qual pode causar um impacto considerável sobre a saúde pública e a qualidade de vida das populações. No entanto, o ruído proveniente do tráfego rodoviário levanta várias questões, pois, se por um lado está associado a vários problemas de saúde e de bem-estar, por outro, a sua inexistência afeta a deteção das fontes sonoras, o que, conseqüentemente, constitui um risco para a segurança dos utilizadores das estradas. Assim, torna-se essencial classificar os pavimentos rodoviários não só com base em indicadores acústicos, mas também com base em indicadores psicoacústicos. Através do método da Proximidade Imediata (CPX) fez-se uma abordagem inovadora para a aquisição de ruído pneu-pavimento. Neste trabalho apresenta-se a caracterização acústica de cinco tipos diferentes de pavimento usando dois indicadores acústicos (nível de pressão sonora máxima e equivalente, com ponderação A) e um psicoacústico (Loudness) em função da velocidade. Cada variável foi relacionada com as respostas de vinte e seis indivíduos sobre a avaliação do incómodo quando submetidos a estímulos compostos pelos sons adquiridos. Como principais resultados, o Loudness mostrou ser uma variável mais sensível à velocidade do veículo e ao tipo de pavimento do que os indicadores acústicos, ajustando-se melhor às respostas individuais.

Palavras-chave: Ruído; Incómodo; Interação Pneu-Pavimento; Método CPX; Loudness

1 INTRODUÇÃO

Durante alguns anos, vários países europeus tentaram implementar programas para a classificação do ruído dos pavimentos rodoviários. Muitos desses programas consistiam em aplicar fatores de correção baseados no tipo de veículo, na percentagem de veículos pesados, na inclinação longitudinal da estrada, no espectro de ruído e na profundidade média de textura, de modo a se classificarem os diversos tipos de superfícies com base numa superfície de referência [1]. Por outro lado, alguns países, como a França e a Holanda, fazem a previsão dos níveis de ruído de tráfego tendo em conta os diferentes tipos ou categorias das superfícies dos pavimentos e a classe dos veículo e suas velocidades.

Alguns projetos europeus que tiveram como objetivo desenvolver modelos de previsão do ruído, como o HARMONOISE ou o CNOSSOS, integram nos seus algoritmos a influência do pavimento na emissão de ruído dos veículos, considerando duas superfícies de referência. Por seu turno, o projeto SILVIA, cujo âmbito foi o desenvolvimento de superfícies rodoviárias sustentáveis para controlo do ruído do tráfego, propôs um sistema de classificação para a caracterização de uma tecnologia específica de pavimentação e para a posterior verificação da conformidade da sua produção quando aplicado na estrada [2]. Os procedimentos desta classificação são baseados no Método Estatístico de Passagem (SPB) e no Método da Proximidade Imediata (CPX), complementados com a determinação de propriedades intrínsecas à superfície da estrada.

Recentemente, Licitra *et al.* [3] desenvolveu uma metodologia baseada no método CPX, a fim de dar uma maior importância à medição do ruído do pneu-pavimento na avaliação dos desempenhos acústicos de uma superfície rodoviária. Segundo os mesmos autores, a uniformidade acústica de cada pavimento pode ser avaliada a fim de se classificar ou se estudar a implementação de pavimentos especiais com o intuito de reduzir o ruído ambiental. Além disso, esta metodologia pode também ser utilizada para avaliar os desempenhos acústicos de um pavimento ao longo do tempo.

Estas diferentes formas de lidar com a classificação acústica dos pavimentos não tomam em consideração parâmetros relacionados com a qualidade do som descritos pelos indicadores psicoacústicos: *Loudness*, *Roughness* ou *Sharpness* (para uma descrição detalhada destes indicadores consultar por exemplo [4]). No entanto, a qualidade do som proveniente do tráfego rodoviário descrita pelos vários indicadores psicoacústicos não só permite uma estimativa subjetiva do grau de incómodo induzido pelo ruído, como também permite a avaliação da influência deste em processos fisiológicos como, por exemplo, a frequência cardíaca [5]. Vários estudos demonstram que o *Loudness* se relaciona melhor com essa estimativa do grau de incómodo do que os indicadores acústicos aos quais é aplicado o filtro de ponderação A [5, 6 e 7]. Este filtro simula a reação do ouvido em função da frequência, sendo o mais utilizado para avaliar a resposta subjetiva do ouvido humano em relação a vários tipos de fontes sonoras.

Neste trabalho analisa-se a adequação do método CPX na determinação de uma relação entre o grau de incómodo e os níveis de ruído de tráfego descritos pelos indicadores acústicos e psicoacústicos: nível de pressão sonora máxima com ponderação A (L_{Amax}), o nível de pressão sonora equivalente com ponderação A (L_{Aeq}) e o indicador da sensação subjetiva de volume sonoro (*Loudness*), em função da velocidade dos veículos. Relação esta, estabelecida com base em dados resultantes das avaliações do grau de incómodo de um conjunto de sons referentes à circulação de um veículo em vários tipos de pavimentos, realizadas por uma série de indivíduos voluntários. Importa ainda referir que durante as medições do ruído através do método CPX não foram consideradas as condições de propagação e de absorção da envolvente física [8].

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Superfícies dos Pavimentos

Os tipos de superfícies de pavimentos selecionadas para o estudo foram (Fig.1): betão betuminoso (BB), frequentemente utilizado em todos os contextos; blocos de cimento (BC) e cubos de granito (CG), muitas vezes usados em contextos urbanos, em particular nos centros das cidades; lama asfáltica (*Slurry Seal*-SS), geralmente usada para melhorar as condições de atrito; e mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha (MBAB), que tem sido utilizada, entre outros motivos, para reduzir o ruído rodoviário [9].

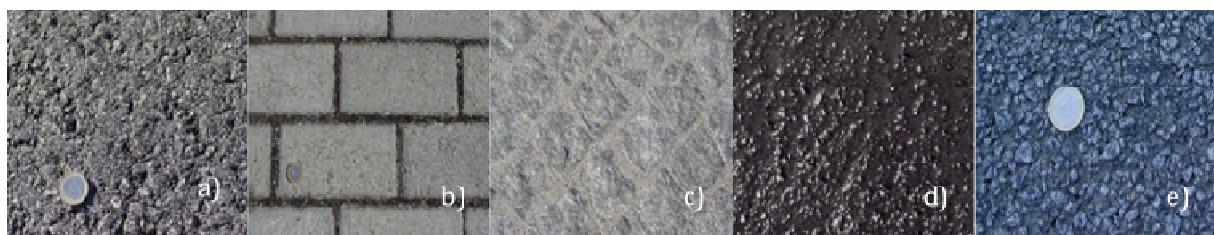


Fig. 1. Superfícies dos pavimentos: a) betão betuminoso (BB); b) blocos de cimento (BC); c) cubos de granito (CG); d) lama asfáltica (SS); e) mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha (MBAB).

As características superficiais destes pavimentos são claramente distintas. A dimensão dos blocos de cimento e dos cubos de granito enquadra-se na gama da megatextura, o que influencia negativamente a produção do ruído. Isto é, no contacto de um pneu com a superfície gera-se mais vibração e simultaneamente ruído aerodinâmico devido à dificuldade de escoamento do ar, aumentando significativamente o nível de ruído.

No que respeita às superfícies, destaca-se a lama asfáltica por ter uma textura positiva, habitualmente associada também a elevados níveis de ruído.

2.2 Aquisição dos Sons

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 da Brüel & Kjær. A disposição dos microfones foi feita de acordo com os critérios impostos pela norma ISO/CD 11819-2, como mostra a Fig. 2. 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.



Fig. 2. Disposição dos microfones para aquisição do ruído resultante da interação pneu-pavimento

Os pneus utilizados no veículo aquando a realização da aquisição dos sons foram os Continental ContiEcoContact3 195/65-R15 que, de acordo com Morgan *et al.* [10], têm um desempenho bastante aceitável para este tipo de aquisições.

2.3 Metodologia Experimental

2.3.1 Participantes

A experiência foi realizada a uma amostra de 10 participantes voluntários, 5 do sexo masculino e 5 do sexo feminino, entre os 21 e os 29 anos de idade (média de idades de 25 anos). Para despistar qualquer deficiência auditiva, os participantes foram previamente submetidos a testes de triagem audiométrica (250, 1000 e 4000 Hz).

2.3.2 Estímulos Auditivos

Através dos sons adquiridos pelo método CPX em cada um dos tipos de superfícies foi gerado um conjunto de estímulos auditivos para as velocidades do veículo de 20, 30, 40 e 50 km/h.

Por conseguinte, foi desenvolvido um total de 20 estímulos (5 tipos de pavimento x 4 velocidades) sendo que cada estímulo tinha a duração de 5 segundos (tamanho necessário para a extração dos indicadores psicoacústicos). Os estímulos foram apresentados através de uma aplicação C++, executada num computador com uma placa de som Intel 82801BA-ICH2, e com recurso a uns headphones AKG K 271 MKII. Este sistema foi calibrado para atingir os níveis de pressão sonora idênticos aos medidos para os sons aquando a sua aquisição. Os valores de L_{Amax} , L_{Aeq} e $Loudness$ foram extraídos com a aplicação Psysound3 [4] a partir dos ficheiros de som com 5 segundos.

2.3.3 Procedimento Experimental

A avaliação do grau de incómodo por parte de cada participante foi realizada numa sala com baixos níveis de ruído. O protocolo adotado segue as regras aceites pela comunidade científica para este tipo de estudos.

Os 20 tipos de estímulos foram apresentados em canal invertido para evitar enviesamentos interaurais e repetidos 5 vezes. Assim, cada participante ouviu um total de 200 segmentos sonoros (20 estímulos x 2 sentidos x 5 repetições) que foram apresentados de forma aleatória para evitar interferências nas respostas relacionadas com a antecipação e expectativa dos participantes.

No caso da avaliação do incómodo, a tarefa incumbida a cada um dos participantes foi a de classificar cada estímulo auditivo numa escala gradual de 1 (pouco incomodativo) a 10 (extremamente incomodativo). Cada uma das referidas tarefas tinha a duração de cerca de 15 minutos. Este tempo foi limitado, para evitar que os participantes na fase final da experiência não respondam de forma aleatória, interferindo nos resultados ou mesmo obrigando à exclusão da contribuição de alguns participantes.

3 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo é discutida a relação entre as respostas dadas pelos participantes nas tarefas de avaliação do grau de incómodo do ruído em função das variáveis que o influenciam, avaliando a forma como os indicadores acústicos e psicoacústicos caracterizam tal relação.

No Quadro 1 apresentam-se os valores dos indicadores LAeq, LMax e Loudness correspondentes a cada um dos diferentes estímulos, por tipo de pavimento e velocidade, assim como os respetivos valores médios do grau de incómodo resultantes das avaliações feitas pelos participantes.

Quadro 1. Indicadores do nível de ruído e valores médios do grau de incómodo

| Tipo de Pavimento | Velocidade (km/h) | LAeq dB(A) | LMax dB(A) | Loudness (Sone) | Incómodo (1-10) |
|-------------------|-------------------|------------|------------|-----------------|-----------------|
| BB | 20 | 71,64 | 72,70 | 25,62 | 2,78 |
| | 30 | 78,90 | 79,86 | 33,79 | 3,80 |
| | 40 | 82,63 | 83,67 | 41,53 | 5,00 |
| | 50 | 87,33 | 88,21 | 54,71 | 7,07 |
| BC | 20 | 73,76 | 75,50 | 30,68 | 3,83 |
| | 30 | 80,81 | 83,68 | 43,82 | 6,71 |
| | 40 | 87,27 | 89,81 | 56,45 | 7,91 |
| | 50 | 91,82 | 94,22 | 70,58 | 8,80 |
| CG | 20 | 78,65 | 81,04 | 40,38 | 6,09 |
| | 30 | 85,82 | 87,32 | 56,06 | 7,72 |
| | 40 | 90,93 | 93,33 | 71,48 | 8,85 |
| | 50 | 94,81 | 96,24 | 86,13 | 9,48 |
| SS | 20 | 76,38 | 77,84 | 34,45 | 4,21 |
| | 30 | 82,66 | 83,80 | 45,44 | 5,55 |
| | 40 | 86,72 | 87,88 | 55,18 | 7,11 |
| | 50 | 91,37 | 92,77 | 68,47 | 8,36 |
| MBAB | 20 | 74,52 | 75,58 | 28,06 | 2,96 |
| | 30 | 81,50 | 82,63 | 37,49 | 4,15 |
| | 40 | 85,58 | 86,74 | 46,02 | 5,50 |
| | 50 | 89,91 | 91,44 | 58,93 | 7,03 |

3.1 Desempenho Acústico e Psicoacústico

De modo a se poder comparar corretamente o desempenho acústico de cada tipo de pavimento em função da velocidade, descrito pelos indicadores LAeq, LAmax e Loudness, todos os dados foram normalizados para escala compreendida entre 0 e 1, como se mostra na Fig. 3.

Pela análise da Fig.3 verifica-se que o pavimento de cubos de granito (CG) corresponde aos valores mais elevados para todos os indicadores, enquanto o pavimento de betão betuminoso (BB) corresponde aos menores.

Por outro lado, os restantes tipos de pavimentos estudados (blocos de cimento (BC), mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha (MBAB) e lama asfáltica (SS)), apesar de serem superfícies muito diferentes, apresentam resultados bastante próximos para os indicadores LAeq e LAmax. Porém, consegue-se distinguir melhor estas superfícies através do Loudness.

Tendo em conta as diferentes velocidades de ensaio, observa-se que os indicadores acústicos, LAeq e LAmax, têm um desempenho semelhante, sendo mais sensíveis às velocidades mais baixas, enquanto que o Loudness mostra ser mais sensível às velocidades mais elevadas.

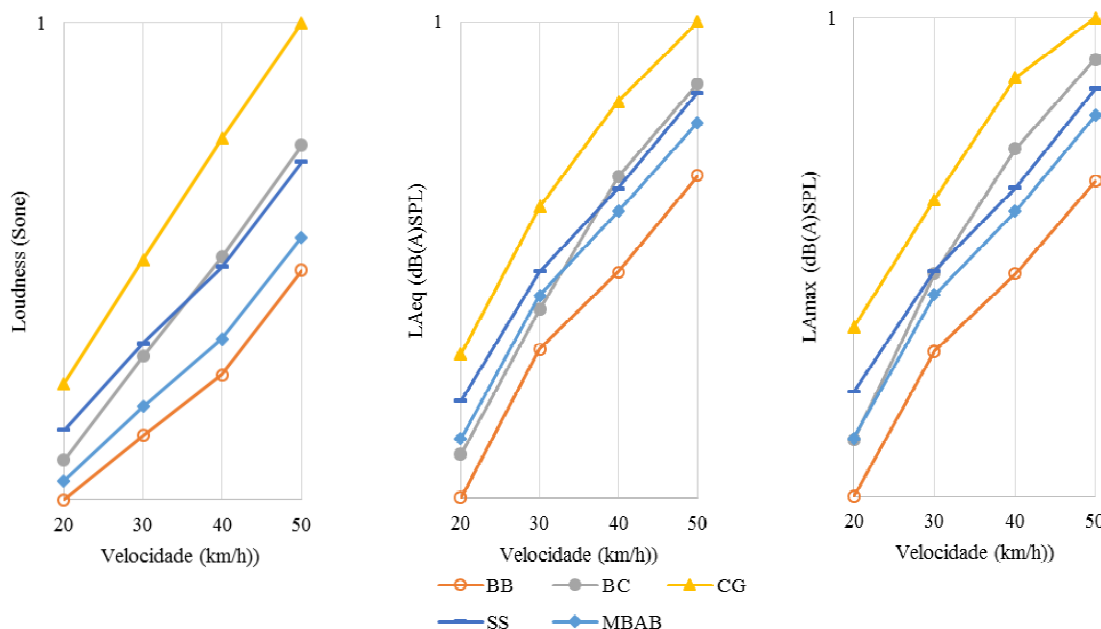


Fig. 3. Valores normalizados dos indicadores acústicos e psicoacústicos segundo o tipo de pavimento e velocidade do veículo

Para uma análise mais detalhada do efeito do tipo de pavimento e de velocidade entre os indicadores acústicos e psicoacústicos, determinou-se a diferença entre os valores normalizados do Loudness e do LAeq (Fig.4 (a) e Fig.4 (b)).

Do ponto de vista da influência do tipo de pavimento (Fig.4 (a)), verificam-se diferenças mais significativas para os valores referentes à mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha (MBAB). No sentido oposto, verifica-se a existência de diferenças menos relevantes para o pavimento de cubos de granito (CG). Destaca-se ainda o facto de os valores das diferenças normalizadas entre os dois tipos de indicadores para os pavimentos de betão betuminoso (BB) e para os blocos de cimento (BC) serem muito semelhantes.

Relativamente à velocidade, pela análise da Fig.4 (b) verifica-se que para as velocidades mais altas, principalmente para a velocidade de 40 km/h, existem maiores diferenças entre os indicadores acústicos e psicoacústicos. Por sua vez, para a velocidade mais baixa (20 km/h) as estas diferenças são muito menos significativas.

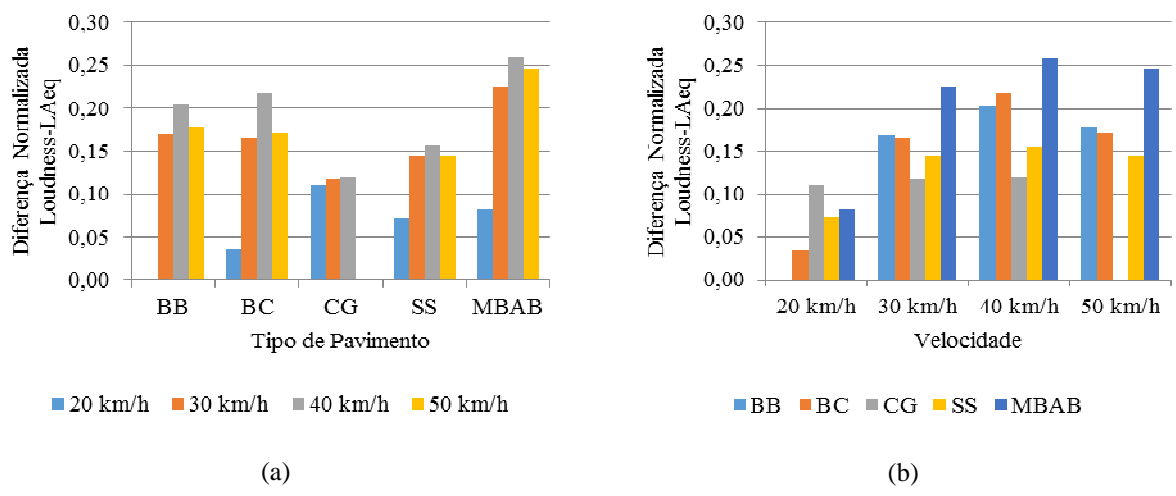


Fig. 4. Diferenças entre os valores normalizados do Loudness e do LAeq segundo: (a) tipo de pavimento; (b) velocidade

3.2 Avaliação do Incômodo

A ANOVA é uma técnica estatística que permite comparar medidas de localização para mais do que dois grupos de observações, que recorre à análise das variâncias dos vários grupos.

Assim, através de uma análise ANOVA, verificou-se que o efeito da velocidade sobre a classificação do grau de incômodo é estatisticamente significativo ($F_{3,75} = 488,9$, $p < 0,001$). Quanto maior a velocidade do veículo, em termos médios, maior é o incômodo sentido pelos participantes (Fig.5).

O tipo de pavimento mostrou também ter um efeito significativo nas respostas dadas pelos participantes ($F_{4,100} = 152,9$, $p < 0,001$), revelando diferenças nas classificações médias de incômodo entre as várias superfícies de pavimento, apesar das semelhanças entre o pavimento de betão betuminoso (BB) e a mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha (MBAB).

Por sua vez, a análise da interação entre a velocidade e o pavimento revelou um aumento linear significativo do nível de incômodo em função da velocidade ($F_{12,300} = 18,66$, $p < 0,001$).

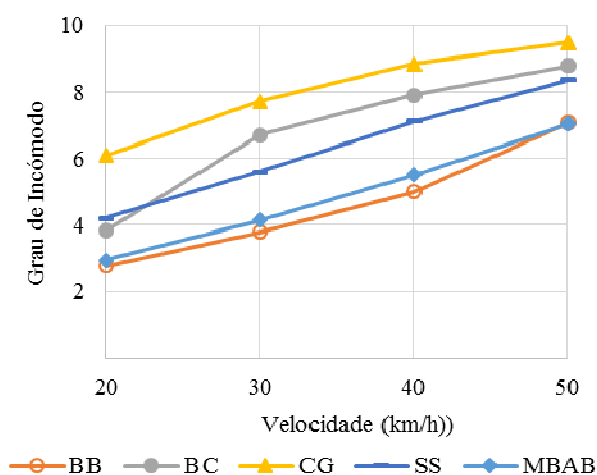


Fig. 5. Grau de incômodo médio segundo as diferentes velocidades dos veículos para cada um dos tipos de pavimento

3.3 Grau de Incómodo vs Nível de Ruído

Atendendo á dificuldade de determinação do grau de incómodo causado pelo ruído de tráfego, neste estudo achou-se pertinente determinar qual o indicador acústico ou psicoacústico que melhor o modela.

Na Fig.6 mostra-se a relação dos valores médios das avaliações do grau de incómodo dos vários estímulos com os respetivos valores dos indicadores acústicos e psicoacústicos. Verifica-se uma tendência claramente linear para o aumento do nível de incómodo com o aumento dos valores dos indicadores. Contudo, a qualidade dos ajustes lineares variam de indicador para indicador. O coeficiente de determinação obtido para o Loudness (0,91) é superior ao determinado para o LAmax (0,89), que por sua vez é superior ao do LAeq (0,84).

Isto significa que o Loudness caracteriza melhor o incómodo proveniente da interação pneu-pavimento sentido pelos participantes do que os indicadores acústicos. Além disso, a inclinação do ajuste entre o grau de incómodo e o Loudness é um pouco maior do que a dos outros, indicando maior sensibilidade deste indicador para as velocidades mais altas.

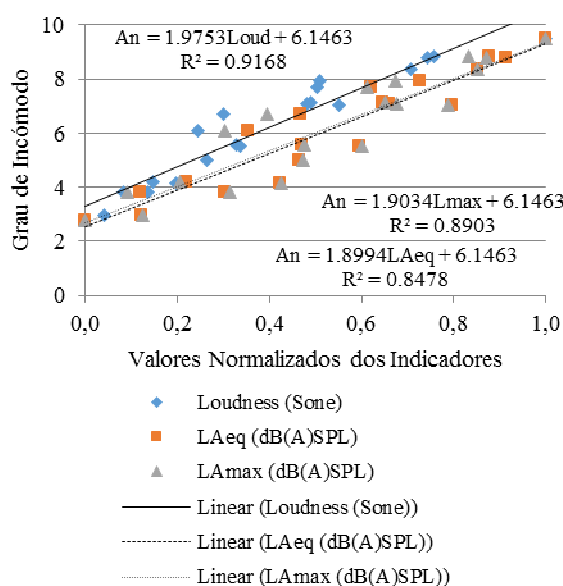


Fig. 6. Relação entre o grau de incómodo e os indicadores acústicos e psicoacústicos

4 CONCLUSÕES

Assim como se previa, este trabalho revelou que os pavimentos betuminosos são os que apresentam menores níveis de ruído, particularmente as superfícies de betão betuminoso e de mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha, sendo que a superfície mais ruidosa, dentro do grupo dos pavimentos betuminosos, é a lama asfáltica que apresenta valores dos indicadores acústicos e psicoacústico superiores aos obtidos para o pavimento de blocos de cimento para as velocidades de 20 e 30 km/h. De todos os tipos de pavimentos o que mais se destaca em termos nível de ruído é o pavimento de cubos de granito, obtendo níveis de pressão sonora e de Loudness superiores para todas as velocidades.

Para além da superfície dos pavimentos, a velocidade mostrou ser uma variável com um importante efeito nos níveis de ruído gerados no contacto do pneu com o pavimento. Para uma variação de 20 km/h para 50 km/h os valores normalizados dos indicadores LAeq, LAmax e Loudness referentes a todos os pavimentos estudados aumentam para mais do dobro.

Por outro lado, o nível de pressão sonora equivalente e o nível de pressão sonora máxima mostraram ser mais sensíveis às velocidades mais baixas, ao contrário do verificado para o indicador psicoacústico Loudness.

Com os resultados obtidos pela avaliação do incómodo provocado pelo ruído resultante da interação entre o pneu e o pavimento, verificou-se que uma abordagem psicoacústica pode dar uma interessante contribuição para a

caracterização de um pavimento, uma vez que o Loudness mostrou ser o indicador que melhor se ajustou às avaliações feitas pelos participantes. Desta forma, é possível afirmar que este indicador é o que melhor caracteriza um pavimento do ponto de vista do seu desempenho acústico. Porém, os resultados deste estudo devem ser usados com algum cuidado, por não serem suficientemente gerais e por isso não podem ser aplicados a qualquer tipo de pavimento e a outras condições de ensaio.

Quanto ao método de aquisição de ruído utilizado, o CPX parece ser um método adequado para fornecer indicadores psicoacústicos a serem utilizados na classificação de pavimento, apresentando resultados consistentes com estudos anteriores baseados no Método da Passagem Controlada (CPB).

Contudo, este estudo apresenta algumas limitações relacionadas com o tipo de pneu usado nas medições e com a variabilidade das medições efetuadas, cujas influências não foram determinadas. Possíveis desenvolvimentos futuros devem considerar o estudo desses fatores, bem como estruturar comparações com o método SPB para analisar o efeito de propagação do som nas avaliações do incómodo.

5 AGRADECIMENTOS

Este artigo foi elaborado com o apoio da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia e contém informação proveniente dos projetos PEst-OE/ECI/UI4047/2014, PEst-OE/EEI/UI0319/2014 financiados no âmbito do Programa Operacional Temático Fatores de Competitividade (COMPETE) e participados pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER e pelo projeto NORTE-07-0162-FEDER-000076-cave@CCG, ON.2 – Programa Operacional Regional do Norte.

6 REFERÊNCIAS

1. G. Descornet, L. Goubert, *Noise Classification of Road Pavements, Task 1: technical background information 1*, Draft Report 05. Directorate-General Environment, European Commission, 2006.
2. D. Padmos, P. Morgan, P. Abbott, G. Blokland, M. Roovers, W. Bartolomaeus, F. Anfosso-Ledée, Classification Scheme and COP Method, *SILVIA Project Deliverable – SILVIA-DWW-025-14-WP2-141005*, 2005.
3. G. Licitra, L. Teti, M. Cerchiai, A modified Close Proximity method to evaluate the time trends of road pavements acoustical performances, *Applied Acoustics*, 76(0) 169-179, 2014.
4. D. Cabrera, S. Ferguson, F. Rizwi, E. Schubert, PsySound3: A Program for the Analysis of Sound Recordings, *Acoustics'08*, 2008.
5. R. B. Raggam, M. Cik, R. R. Höldrich, K. Fallast, E. Gallasch, M. Fend, A. Lackner, E. Marth, Personal noise ranking of road traffic: Subjective estimation versus physiological parameters under laboratory conditions, *International journal of hygiene and environmental health*, 210(2) 97-105, 2007.
6. E. Freitas, C. Mendonça, J. A. Santos, C. Murteira, J. P. Ferreira, Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17(4) 321-326, 2012.
7. G. Licitra, M. Cerchiai, L. Teti, L. Alfinito, Road pavement description by psycho-acoustical parameters from CPX data, *Paper presented at the Inter.noise*, 2009.
8. F. G. Praticò, Roads and Loudness: a More Comprehensive Approach, *Road Materials and Pavement Design*, 2(4) 359-377, 2001.
9. E. Freitas, The effect of time on the contribution of asphalt rubber mixtures to noise abatement, *Noise Control Engineering Journal*, 60(1) 1-8, 2012.
10. P. Morgan, U. Sandberg, G. Blokland, The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3, *Paper presented at the Inter.noise*, 2009.