

Seminário

Gestão da Velocidade e do Ruído Rodoviário

Editor: Elisabete Freitas
29 e 30 de Maio de 2012, Guimarães

Gestão da velocidade e do ruído rodoviário
Management of speed and road noise

Livro das atas do seminário

Proceedings of the seminar

Universidade do Minho, Azurém – Guimarães – Portugal

29 e 30 de maio de 2012

29th and 30th May 2012

Editado por

Edited by

Elisabete Freitas

Departamento de Engenharia Civil
Universidade do Minho, Portugal

Organização Organisation

Universidade do Minho

Colaboração Cooperation

Universidade do Porto

Universidade de Coimbra

Universidade de Brasília

Centro de Computação Gráfica (Guimarães)

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

French Institute of Sciences and Technology for Transport, Development and Networks

Belgian Road Research Centre

Swedish National Road and Transport Research Institute

Apoio Institucional Institutional Support

Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Fundação para a Ciência e para a Tecnologia

Comité Organizador Organising committee

Elisabete Freitas

Paulo Pereira

Universidade do Minho

Ana Bastos

Universidade de Coimbra

Carlos Rodrigues

Universidade do Porto

Patrocinadores
Sponsors



Este livro foi elaborado a partir da reprodução direta dos originais preparados pelos autores. Por conseguinte, o editor não pode aceitar qualquer responsabilidade pelo conteúdo e por possíveis incorreções do texto.

ISBN 978-972-8692-70-4

Universidade do Minho – Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Civil, Azurém, P-4800-058 Guimarães, Portugal
Tel: +351253510200, Fax: +351253510217, email: efreitas@civil.uminho.pt

Índice

Summary

Prefácio Preface	5
----------------------------	---

Gestão da Velocidade

Speed management

Estimação da Velocidade máxima legal apropriada a cada trecho <i>Ana M. Bastos Silva, Alvaro Seco</i>	7
Controlo da velocidade em Zonas de Aproximação, Transição e Urbana <i>Ana Bastos Silva, Sílvia Santos</i>	25
Procedimento para identificação de fatores a serem considerados em estudos de engenharia voltados à definição de velocidade limite para rodovias <i>Maria Alice Prudêncio Jacques, Érica Marques</i>	40
Excesso de velocidade: Perfil psicológico dos infratores <i>Inês Margarida Dimas, Elisabete Freitas, Paulo Pereira</i>	50
Acidentes rodoviários das estradas nacionais de Portugal: estudo da associação entre as variáveis e modelo de previsão de acidentes <i>Jocilene Costa, Paulo Pereira, Elisabete Freitas, Maria Alice Prudêncio Jacques</i>	64
Utilização da nanotecnologia na preparação de misturas asfálticas com capacidade fotocatalítica <i>Joaquim Carneiro, Filipa Fernandes, Vasco Teixeira, José Heriberto Nascimento, Elisabete Freitas, Paulo Pereira</i>	81

Gestão do ruído

Noise management

O enquadramento legal do ruído em Portugal – história e desafios <i>Jorge Patrício</i>	95
Assessment & management of environmental noise in EU - the contribution of tyre-road noise reduction <i>Fabienne Anfosso-Lédée</i>	102
Tire-road noise: a state of affairs <i>Luc Goubert</i>	111
Caracterização do ruído pneu-pavimento nas estradas portuguesas <i>Elisabete Freitas, Pedro Machado, Isaac Raimundo</i>	135
Superfícies de baixo ruído com materiais inovadores <i>Elisabete Freitas, Joel Oliveira, Pedro Machado, Simão Pereira</i>	147
Modelos de previsão do ruído pneu-pavimento <i>Elisabete Freitas, Carina Freitas</i>	156
Noise perception, psychoacoustic indicators, and traffic noise <i>Catarina Mendonça</i>	166
Tyre-road noise: annoyance and detection of incoming traffic <i>Jorge A. Santos</i>	176

Prefácio

Preface

A gestão da velocidade e a gestão do ruído rodoviário são duas atividades essenciais com vista à gestão integral das estradas, com fortes impactos económicos, sociais e ambientais.

O seminário “Gestão da velocidade e do ruído rodoviário” teve como objetivos contribuir para uma gestão mais eficaz da velocidade e do ruído rodoviário, com a apresentação do estado dos conhecimentos nestes domínios e a divulgação das atividades e dos resultados obtidos nos seguintes projetos de investigação: Safespeed - *Estratégias de gestão da velocidade: um instrumento para a implementação de soluções de gestão rodoviária seguras e eficientes* (PTDC/TRA/72998/2006) e Noiseless - *Percepção, modelação e redução do ruído através de superfícies de pavimentos inovadoras e duráveis* (FCOMP-01-0124-FEDER-007560).

Na expectativa que os profissionais da indústria e das administrações das infraestruturas de transporte, docentes e investigadores encontrem neste livro um apoio para as suas atividades, este inclui não só os resultados dos projetos de investigação, mas também a contribuição de especialistas nacionais e estrangeiros com larga experiência nestes domínios.

Speed management and management of road noise are two activities essential in any comprehensive road management system, with strong economic, social and environmental impacts.

The seminar "Management of speed and road noise" aimed to contribute to more efficient management of speed and traffic noise, with the presentation of the state of the art in these areas and the dissemination of activities and results obtained in the following research projects: Safespeed - *Speed management strategies: an instrument for the implementation of safe and efficient road management solutions* (PTDC/TRA/72998/2006) and Noiseless - *Noise perception, modelling and abatement using innovative and durable pavement surface layers* (FCOMP-01 -0124-FEDER-007560).

In the expectation that industry professionals and administrations of transportation infrastructures, teachers and researchers consider this book as a support to their activities, this includes not only the results of the research projects, but also the contribution of national and international experts with extensive experience in these domains.

Guimarães, setembro de 2012

Elisabete Freitas

Gestão da Velocidade
Speed management

ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA LEGAL APROPRIADA A CADA TRECHO

Ana M. Bastos Silva*

Alvaro Seco

Universidade de Coimbra, Depart. Eng^a Civil - Coimbra, Portugal,

E-mail: abastos@dec.uc.pt

RESUMO

O presente artigo centra-se no desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de suportar objectivamente o processo de definição do limite de velocidade adequado para um determinado troço viário, em função das suas características geométricas e funcionais prevaletentes. São utilizadas duas metodologias distintas: técnicas de correlação e regressão múltipla e, modelo de escolha discreta (Nlogit). O trabalho é apoiado numa base de dados real, recolhida por um conjunto de especialistas, a quem foi pedida a avaliação da velocidade desejada em cada trecho, face ao nível de conflituosidade local. Os modelos finais mostraram-se bastantes consistentes e capazes de produzir estimativas para os limites de velocidades a aplicar a diferentes ambientes, baseados na quantificação de um número restrito de variáveis relativas à via e ao seu ambiente envolvente.

A GESTÃO DE VELOCIDADES EM MEIOS INTER-URBANOS

As estradas Nacionais e Regionais respondem habitualmente ao tráfego gerado por pequenas vilas ou aglomerados urbanos que se vão formando e desenvolvendo ao longo destes eixos. Essas estradas são normalmente projectadas para assegurarem fluxos contínuos e níveis elevados de fluidez, sendo frequentemente sujeitas a limites de velocidade pouco restritivos.

O aumento da ocupação marginal e o desordenamento do uso do solo ao longo deste tipo de vias, tem obrigado a repensar os métodos e critérios que suportam a definição dos limites de velocidade, designadamente em trechos que envolvem variações sistemáticas ao ambiente circundante.

De facto, até à década de 80 as recomendações técnicas valorizavam a definição de soluções padrão baseadas fundamentalmente em preocupações operacionais e sem consideração pela sua integração no meio rodoviário envolvente. Mas a experiência veio mostrar que estas soluções envolviam frequentemente níveis elevados de conflituosidade e de acidentes, resultantes da utilização, nem sempre pacífica do mesmo espaço por utilizadores com características básicas bastante diferenciadas.

As análises de sinistralidade levadas a cabo, um pouco por todo o mundo, apontaram de forma cada vez mais consensual, para a velocidade como sendo uma das principais causas dos acidentes em meio urbano e de transição. Foram vários os estudos científicos desenvolvidos que demonstraram o efeito directo da velocidade quer na frequência quer na gravidade dos acidentes (TRB, 1998). Outros estudos permitiram avaliar o efeito da velocidade na probabilidade de morte ou de ferimentos graves nos peões, na sequência de atropelamentos. Outros evidenciaram o seu efeito no número e gravidade dos acidentes com ciclistas.

Estes resultados associados a uma cada vez maior consciencialização popular sobre os efeitos nefastos associados à velocidade, justificaram a necessidade de repensar os critérios de definição dos limites legais da velocidade e de formas eficazes para o seu controlo.

De facto a imposição de limites legais de velocidade veio contribuir para a melhoria de segurança de duas formas distintas: em primeiro lugar, ao definir uma velocidade máxima admissível contribui para a redução tanto da probabilidade como da gravidade dos acidentes; em segundo lugar, através da sua contribuição para a homogeneização da sua distribuição. Em complemento, o estabelecimento de limites de velocidade legais está ainda historicamente relacionado com a tentativa de racionalização do consumo energético dos transportes e de controlo das emissões ambientais.

Como tal, é já na década de 80 que alguns países Europeus, mas também nos Estados Unidos, Canada e Austrália, defendem a definição de limites de velocidade concordantes com as naturais expectativas dos condutores e portanto baseados em critérios de segurança rodoviária. Estas questões assumiram particular relevância em estradas rurais que atravessam diferentes ambientes rodoviários, onde os atravessamentos urbanos se cobriram de uma necessidade crescente de conjugar à procura de fluidez preocupações ligadas à qualidade de vida local (Stamatiadis, 2001; DfT, 2002; Neuman et al., 2002). De facto, neste tipo de estradas é possível identificar trechos que se desenvolvem em ambiente puramente rural, passando por zonas de transição com habitação dispersa, até ao puro urbano onde interagem diferentes interesses e utilizadores.

Actualmente é consensualmente aceite que apenas uma avaliação integrada é capaz de ter em consideração de forma coerente e lógica os interesses e necessidades associados aos diferentes utilizadores do espaço. Por um lado apresenta-se o tráfego de atravessamento que procura condições de circulação fluidas e contínuas, enquanto que, por oposição, os moradores locais exigem condições de acessibilidade e de segurança real e induzida.

Tal constatação reforça a necessidade de se desenvolverem metodologias e estratégias coerentes de gestão de velocidades capazes de apontar, para cada ambiente rodoviário, qual a velocidade limite mais adequada, tendo por base um conjunto de variáveis facilmente mensuráveis e caracterizadoras do grau de conflituosidade local. Complementarmente importa ainda definir regras que salvaguardem a praticabilidade da variação desses limites, tendo por base princípios de consistência de velocidades ao longo de um itinerário.

Os primeiros exemplos deste tipo de abordagem, centraram-se na definição dos limites de velocidade concordantes com a prática corrente local, e portanto baseados na medição do percentil 85 da distribuição das velocidades.

Já em 2000 surgem novas metodologias de abordagem, baseadas em questões físicas e operacionais. São exemplos deste tipo de aplicações a família de aplicações Xlimits e USlimits, de origem australiana e americana, os quais permitem estimar o limite de velocidade em função de um conjunto alargado de variáveis ligadas à infra-estrutura, uso do solo, condições de operação e sinistralidade local. Estes modelos para além de adaptados às características dos países de origem exigem a disponibilização de um conjunto alargado de informação, nem sempre disponível, designadamente em Portugal. É o caso do histórico de acidentes locais ou da distribuição das velocidades que, de forme geral é difícil, ou economicamente insustentável de obter, para cada trecho em análise.

Em Portugal, a sua definição continua a ser baseada no regime de circulação conforme estabelecido pelo Código da Estrada, podendo esse limite ser reduzido em situações onde o grau de conflituosidade o justifique. A inexistência de critérios técnicos, lógicos e coerentes leva a que essa redução seja feita de forma casuística, ficando maioritariamente dependente de critérios pessoais. Em consequência, o

país está pautado por uma total falta de uniformidade no tratamento das situações, sendo ainda comum encontrar trechos sujeitos a limites de velocidade que violam as expectativas naturais dos condutores. Este problema é comum a diversos países estrangeiros o que tem justificado o desenvolvimento de diversos trabalhos de investigação, com resultados nem sempre consensuais.

Nessa óptica, esta comunicação centra-se na apresentação das diferentes metodologias e abordagens seguidas ao longo do tempo para definição dos limites de velocidades em trechos de estrada sujeitos a diferentes ambientes rodoviários, desenvolvidos no âmbito do projecto de investigação SAFESPED, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia.

São identificadas as variáveis e factores considerados como os mais relevantes na definição desses limites, tendo por base a experiência internacional e os modelos de estimação já desenvolvidos. Suportado por uma base de dados real, são desenvolvidos e apresentados dois modelos simples capazes de estimar de forma lógica o limite de velocidade mais adequado a cada trecho, tendo por base um conjunto de variáveis explicativas facilmente mensuráveis ligadas a estrada e ao meio envolvente.

IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA

A maioria das vias interurbanas está associada a um problema decorrente do deficiente planeamento territorial: o aparecimento e crescimento das povoações de forma espontânea ao longo das vias, traduzindo-se no atravessamento de trechos que passam do puro rural, pela habitação dispersa, até ao domínio urbano. Por vezes, estas vias assumem uma importância nacional ou regional, respondendo a níveis de procura elevados, o que justifica a geração de conflitos graves, designadamente entre os diferentes utilizadores envolvidos.

A definição dos locais fronteira apropriados para impor alterações ao regime de circulação e, por consequência, à alteração dos limites de velocidades mais adequados a cada trecho, revela-se particularmente complexa e de difícil resolução. A inexistência de quaisquer documentos técnicos recomendativos ou normativos, dificulta essa tarefa, traduzindo-se de forma geral, no tratamento de situações similares através da adopção de soluções distintas. A infraestrutura rodoviária é assim pautada por uma falta de uniformidade e de rigor no seu tratamento, sendo frequente encontrar soluções que não respeitam as naturais expectativas do condutor, induzindo assim a problemas de segurança rodoviária e à tendencial descredibilização da sinalização local.

Em Portugal, a legislação vigente está por vezes na base da geração de algumas dessas situações, destacando-se duas em particular: (i) a simples existência do sinal N1 “entrada na localidade”, impõe só por si o “regime urbano” o qual de acordo com o Código da Estrada se associa à velocidade máxima legal de 50 Km/h, ainda que o tecido urbano se desenvolva à margem da estrada e sem qualquer interacção com esta (Fig. 1); (ii) a imposição do regime urbano de circulação e, por consequência a velocidade máxima de 50km/h, é definido, independentemente do nível de conflituosidade registado e do tipo de traçado envolvido. É recorrente encontrar-se trechos de atravessamento com elevada ocupação e actividade marginal à via, associados a traçados rectilíneos e a perfis transversais tipos alargados (múltiplas vias e bermas largas). Considera-se que em qualquer uma destas duas situações existe uma clara violação às expectativas naturais dos condutores, constituindo trechos tendencialmente problemáticos do ponto de vista da segurança.



Fig. 1. Velocidade máxima de 50 km/h em locais sem ocupação marginal.

Assim, mais do que em qualquer outra tipologia viária, as vias inter-urbanas, pela diversidade de ambientes que atravessam e, conseqüentemente, pelas diversas funções que desempenham, apresentam-se como a tipologia ideal para a implementação de estratégias de gestão de velocidades capazes de atender às particularidades de cada trecho.

DEFINIÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA

Enquadramento

O planeamento, projecto e construção de estradas foi, durante muitos anos, um processo sectorial, da responsabilidade exclusiva dos engenheiros rodoviários e do poder político. O planeamento geral da rede, a concepção do traçado, a localização dos nós e intersecções, as características do perfil transversal, etc., eram baseadas maioritariamente em critérios ligados ao nível de serviço e ao custo de construção (Neuman, T. et al, 2002). Esta filosofia, que até às décadas de 60 e 70 era consensual, foi sofrendo evoluções progressivas, sendo actualmente considerada uma avaliação ultrapassada e redutora.

Havendo um claro discernimento da importância da rede rodoviária na transformação do espaço, na economia local, no ambiente envolvente, no quotidiano das povoações, etc., passou-se de uma situação em que esta temática era abordada de forma padronizada por engenheiros e técnicos rodoviários, para outra em que se entende fundamental o estudo pormenorizado de todas as características dos troços rodoviários e do espaço de implantação, através de uma equipa multi-disciplinar. Note-se esta evolução principiou e desenvolveu-se nos países mais desenvolvidos económica e culturalmente e naqueles que mais tradição têm na investigação rodoviária: França, Holanda, Dinamarca, Reino Unido, Austrália, Estados Unidos da América e Canadá.

Esta abordagem multi-disciplinar e multicritério consistiu no reconhecimento de que cada projecto rodoviário e cada via são únicos. As especificidades da área de intervenção, os valores da comunidade, as necessidades dos utilizadores, as capacidades e oportunidades são factores únicos que os técnicos devem considerar em cada projecto. Foi deste reconhecimento e da necessidade de considerar as diversas vertentes de uma estrada que nasceram as estratégias de gestão da velocidade.

Esta integração de preocupações, esteve na base de um conjunto alargado de conceitos de gestão da velocidade desenvolvidos em diversos países, sendo de salientar as seguintes (Mackey, P., 2004):

- “Ville plus sûre, quartiers sans accidents”, França;
- “Environmentally-adapted through roads”, Dinamarca;
- “Village Speed Control Working Group”, Reino Unido;
- “Environmental Adaptation of the Main Street in Rural Towns”, Austrália.

Estas estratégias de gestão da velocidade passam habitualmente pela redefinição dos limites de velocidade, seleccionando valores adequados às características próprias de cada troço e da sua envolvente, equilibrando a necessidade de garantir condições de segurança com a necessidade de garantir condições de mobilidade (DfT, 2006).

Sem por em causa a utilidade dos limites de velocidade, são cada vez mais questionados os critérios e métodos que sustentam a sua determinação sendo que cada vez mais se valoriza a definição de limites devidamente adequados ao ambiente rodoviário envolvente e ao grau de conflituosidade que ele representa. Este facto reflecte-se nos diversos métodos e estudos desenvolvidos nos últimos anos com o objectivo de estabelecer técnicas de definição dos limites de velocidade para diferentes ambientes rodoviários.

Métodos para a definição da Velocidade Legal Limite

REGIMES DE CIRCULAÇÃO - Este método utilizado em Portugal e em alguns estados americanos, resulta da atribuição de limites máximos legais a cada um dos regimes de circulação impostos pela lei local. É habitualmente especificado para diversas categorias de estrada e associados a sinalização local (auto-estrada, via reservada a automóveis e motociclos e restantes vias, povoações) (ANSR@, 2009), sendo habitualmente adoptado esse valor para aferir a velocidade base e, por inerência, as características prevaletentes do traçado.

Esta metodologia básica não integra o efeito de quaisquer parâmetros relacionados com o ambiente rodoviário envolvente à via, limitando-se a atender a uma classificação hierárquica, os quais nem sempre correspondem efectivamente aos limites físicos da área povoada.

Nos EUA embora exista um limite legal de velocidade definido pelo poder político e que pode variar de estado para estado, estes limites não são rígidos pois é possível a aplicação de velocidades limites diferentes ao longo de troços específicos de uma via, através das denominadas “*speed zones*”.

LIMITES ÓPTIMOS DE VELOCIDADE - A metodologia proposta por Oppenlander (1962) assenta na definição do custo generalizado por milha associado a uma viagem, numa combinação das seguintes 4 componentes: operação dos veículos, tempo de viagem, acidentes e serviço (conforto da viagem). Desta forma, esta metodologia reflecte o efeito das características físicas e ambientais específicas da envolvente de um determinado trecho de via.

Apesar de constituir um modelo conceptualmente interessante e completo, o mesmo nunca foi aplicado, designadamente pela dificuldade de quantificar as suas variáveis envolvidas, como por exemplo o valor em termos de custo da mortalidade, ferimentos e do tempo de viagem (Oppenlander, 1962).

LEI BÁSICA DE LIMITES (BASIC LAW LIMITS) - Esta abordagem consiste em deixar ao critério do condutor a determinação da velocidade de circulação que considera razoável e prudente.

Esta metodologia é actualmente utilizada em algumas vias rápidas da Alemanha e EUA, embora nos EUA esta prática se limite a boas condições climáticas e de visibilidade (Figura 2).

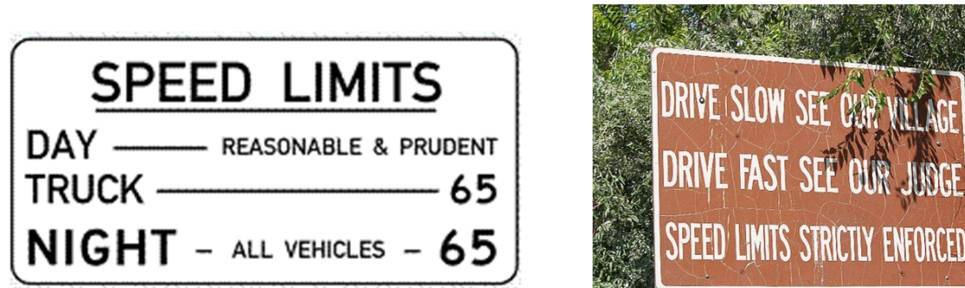


Fig. 2. Exemplo Limite de velocidade (EUA).

PERCENTIL 85 DA DISTRIBUIÇÃO DA VELOCIDADE - Este método, adoptado, entre outros países, na Austrália e em alguns estados dos USA fixa a velocidade máxima próxima do percentil 85 da distribuição das velocidades registadas a nível local. Este método assume que a maioria dos condutores são capazes de avaliar a velocidade a que podem circular com segurança (Fitzpatrick et al., 1997) contribuindo ainda para uma maior uniformidade de comportamentos. Tendem ainda a minimizar as oportunidades de ocorrência de conflito entre veículos salvaguardando um nível elevado de acatamento, por parte dos condutores (Joscelyn and Elston, 1970; Solomon, 1964; Cirillo, 1968; RTI, 1970).

Como principal ponto fraco, verifica-se que esta metodologia tem vindo, ao longo dos anos, a justificar o aumento da velocidade de circulação dos veículos e aumento da dispersão das velocidades, traduzindo-se em termos globais num agravamento das condições de segurança. Por outro lado, esta metodologia não se adapta devidamente a todas as classes de vias, designadamente as urbanas, já que tendencialmente o limite tende a ser representativa das condições prevalecentes da infraestrutura (Harwood, 1995), negligenciando aspectos ligados à interactividade entre a via e o meio envolvente.

MÉTODOS DE ENGENHARIA - Este método é muito utilizado nos USA para determinação da velocidade máxima nas denominadas “Speed Zones”. Este método requer a recolha de diversos dados, designadamente medições das velocidades de circulação, do volume de tráfego, historial sobre sinistralidade rodoviária, classe e condições físicas da infra-estrutura rodoviária, geometria da via, limites de velocidade legais, características da envolvente do troço da via em análise principalmente no que se refere à densidade e proximidade de obstáculos.

O recurso a softwares que reproduzem o processo de pensamento de um grupo de peritos para resolver os mais diversos problemas complexos (Donald, 1994). A família de softwares XLIMITS desenvolvido pelo ARRB Transport Research (Fildes et al, 2005) é um desses exemplos o qual, foi posteriormente adaptado a outros países como Nova Zelândia e EUA.

Tendo por base um conjunto alargado de variáveis de base ligadas à caracterização da área envolvente e do trecho em análise (ambiente, número de vias, existência de separadores centrais, densidade e proximidade de obstáculos das bermas, extensão, etc.), limites de velocidade existentes no local, dados

de sinistralidade rodoviária, espectro de velocidades, etc, o software aponta aquela que é a velocidade máxima mais adequada a cada caso.

PRESSUPOSTOS METODOLÓGICOS E METODOLOGIA ADOPTADA

O desenvolvimento do presente trabalho assenta na premissa de que a velocidade máxima a estabelecer em cada trecho de estrada deverá resultar da quantificação independente de duas componentes fundamentais: (i) a conflituosidade local relacionada com o uso do solo e com a interactividade e atrito associados às actividades que se desenvolvem marginalmente à estrada estabelecida através da aqui denominada velocidade segura (V_s) e, (ii) as características físicas prevalentes do traçado e da sua envolvente, aqui representadas através do percentil 85 da velocidade (V_{85}). A velocidade máxima legal, em cada trecho, deverá corresponder ao menor destes dois valores (Figura 3).



Fig. 3. Metodologia para identificação da velocidade máxima legal em cada trecho.

Importa ainda ter presente que a procura de traçados auto-explicativos deverá exigir a definição de soluções globais combinadas devidamente ajustadas e concordantes com as expectativas naturais dos condutores, pelo que idealmente este processo deverá integrar indicadores de controlo. De facto, quando se compara o valor estimado ou medido da V_{85} com o da V_s , duas situações podem ocorrer (Figura 4): (1) sempre que a V_{85} é inferior à V_s , significa que a velocidade máxima é imposta pelas condicionantes do traçado (por exemplo um traçado muito sinuoso, ou com inconsistências), estando salvaguardadas as expectativas dos condutores; (2) sempre que a V_{85} é superior à V_s , verifica-se que a velocidade máxima é estabelecida em função do nível de conflituosidade local, contudo o traçado geral da estrada potencia a prática de velocidades superiores o que, em termos práticos, se traduz na geração de situações incongruentes e em problemas sérios de segurança. Neste tipo de situações importa promover a adaptação das características físicas do traçado, designadamente através da aplicação de medidas de controlo físico da velocidade compatíveis com a velocidade pretendida para o local. As medidas de acalmia encontram aqui um dos seus domínios privilegiados de aplicação.

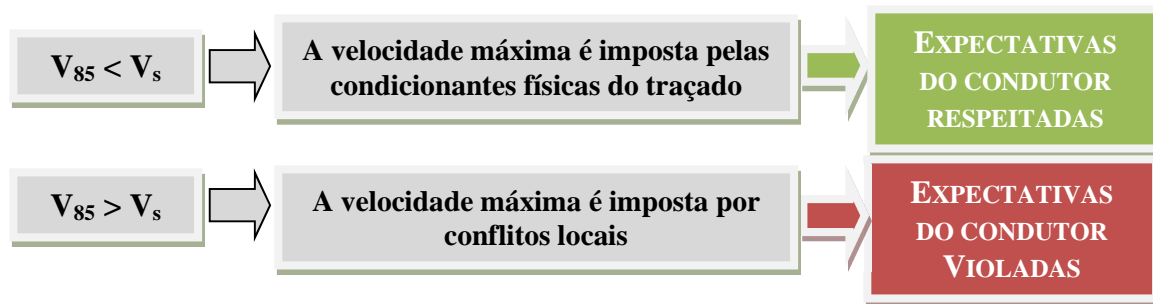


Fig. 4. Avaliação da qualidade do ajuste das características da infraestrutura com a velocidade máxima estabelecida.

A implementação deste processo metodológico pressupõe, em termos globais, a quantificação/estimação de 2 variáveis: a V_{85} e a V_s . O presente artigo centra-se na estimação da velocidade segura (V_s), podendo a V_{85} ser estimada por recurso a modelos matemáticos existentes ou ser medida directamente na secção em estudo.

De facto, a estimação da velocidade em regime livre, face às características físicas do traçado da estrada (traçado em planta, perfil longitudinal e perfil transversal) tem vindo a ser objecto de diversos estudos de investigação, sendo possível contar com alguns modelos para a sua estimação (ver a título de exemplo, Cardoso, 1996; Fitzpatrick *et al.*, 1997; 2003). Por sua vez, a velocidade segura não tem sido muito estudada (Donald, 1994; Correia e Bastos Silva, 2011), pelo que continua a merecer investigação no sentido de se definir um modelo suficientemente robusto que, com base em variáveis fáceis de obter ou de medir, seja capaz de apontar de forma coerente e lógica qual a velocidade mais adequada a cada trecho de estrada.

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA

Os modelos aqui apresentados procuram estabelecer uma relação directa entre as principais características da via e da sua envolvente, integrados no um método de engenharia anteriormente exposto. O desenvolvimento do modelo assentou no princípio de base de que o valor sugerido pelo modelo se cinge a avaliar o grau de conflituosidade relativo a cada eixo, deixando de fora aspectos ligados às características físicas do traçado. Nessa óptica, a velocidade limite a estabelecer em cada trecho deverá resultar da compilação entre o valor estabelecido pelo modelo agora em desenvolvimento e o percentil 85 da distribuição de velocidades (aqui considerado como a velocidade base estabelecida), prevalecendo o mais restritivo.

Variáveis consideradas

Tendo por base, por um lado, a bibliografia da especialidade consultada (Greibe *et. al.*, 1999; Austroads, 2005) e por outro lado, a realidade nacional, foram consideradas as seguintes 14 variáveis caracterizadoras das vias e sua envolvente:

V ₁ – Cruzamentos;	V ₈ – Atravessamento pedonais formais;
V ₂ – Acessos a garagens;	V ₉ – Postos de abastecimento de combustível;
V ₃ – Acessos motorizados a terrenos;	V ₁₀ – Semáforos;
V ₄ – Acessos a lugares de estacionamento;	V ₁₁ – Acesso a parques;
V ₅ – Acessos a caminhos pedonais;	V ₁₂ – Existência/ausência de passeios;
V ₆ – Acessos pedonais a casas;	V ₁₃ – Nível médio de restrições laterais;
V ₇ – Paragens de autocarro;	V ₁₄ – Nível elevado de restrições laterais

Este conjunto de variáveis é bastante limitado particularmente quando comparado com o adoptado pelo programa XLIMITS, contudo considera-se que as variáveis seleccionadas definem suficientemente bem as características físicas da via e da sua envolvente, salvaguardando ainda a facilidade de aplicação do modelo.

As variáveis V₁ a V₁₁ são facilmente quantificáveis pelo que o seu registo foi feito em unidades de medida (número de acessos, numero cruzamentos, numero de postos de combustível, etc.). Por sua vez as variáveis V₁₂, V₁₃ e V₁₄ foram tratadas como variáveis binárias, assumindo o valor 1 se é verificada a ocorrência da variável ou de 0 se a mesma não é verificada.

Metodologia adoptada

A metodologia adoptada neste trabalho assentou no julgamento daquela que é a velocidade segura apontada por um conjunto de 4 observadores especialistas. Todos os especialistas são docentes do ensino superior na área da segurança rodoviária, apresentando complementarmente experiência profissional relevante nessa área. Aos especialistas foi solicitada a identificação da velocidade máxima adequada a cada trecho tendo unicamente por base o nível de interactividade da estrada com o meio envolvente, desprezando aquelas que são as características prevaletentes do traçado, designadamente a existência de um traçado sinuoso ou acidentado. Através desse julgamento especializado foi construída uma base de dados real a qual foi complementada pelo levantamento *in situ* de um conjunto alargado de variáveis relacionadas com a infra-estrutura e com o meio envolvente e que caracterizaram cada um dos trechos estudados.

Foram seleccionados três itinerários de estradas nacionais, todos caracterizados pela disponibilização de uma única faixa de rodagem (uma via em cada sentido de circulação) e que no seu conjunto totalizaram 45 km de extensão. Todos os itinerários apresentavam em comum uma grande variabilidade de ambientes rodoviários, integrando designadamente vários atravessamentos de localidades. Cada um destes itinerários foi posteriormente subdividido em trechos de análise com 200 metros de comprimento de modo a, por um lado, constituir uma dimensão suficientemente curta para garantir a homogeneidade das características físicas e de ocupação e, por outro lado, suficientemente longo para permitir ao especialista avaliar, de forma global, as características gerais do trecho. Os 200 metros constituíram ainda uma solução de compromisso para que, o observador sem se esquecer das características do troço imediatamente anterior percecionasse as alterações no troço consecutivo, garantindo assim uma visão integrada entre os trechos consecutivos.

De modo a simplificar a análise optou-se por considerar que os atravessamentos de localidades são subdivididos em 3 trechos fundamentais (Figura 5): (i) o *trecho rural* e de aproximação ao espaço urbano, caracterizado pela inexistência de actividade urbana e ao qual se atribuiu a velocidade máxima estabelecida pela lei Portuguesa (90km/h); (ii) o *trecho de transição* localizado entre os trechos de

aproximação e o urbano, caracterizado pelo surgimento de algumas edificações nos espaços marginais de forma dispersa, mantendo algum afastamento em relação à faixa de rodagem. Foi-lhe atribuída a velocidade de referência de 70km/h; e (iii) o *trecho urbano* caracterizado pela existência de uma densidade edificatória elevada e por uma actividade marginal acentuada relacionada com a presença de outros utilizadores (tais como peões e ciclistas), de movimentos de acesso local (acessos a propriedades, inversões de marcha, estacionamento, etc.). A velocidade máxima atribuída a estes trechos segue, mais uma vez, a velocidade estabelecida pelo Código da Estrada Português em regime urbano, ou seja 50 km/h.



Fig. 5. Divisão do trecho de atravessamento em zonas de actuação.

Nesta base, foi solicitado a cada um dos especialistas que apontasse o valor da velocidade máxima considerada como adequada em cada trecho, limitando a gama de opções aos seguintes 3 patamares: 90, 70 e 50 km/h.

Os dados recolhidos em cada uma das sessões foram posteriormente introduzidos numa base de dados, tendo-se seleccionado a aplicação estatística *Statistica* da *Statsoft* como ferramenta de apoio ao desenvolvimento dos modelos matemáticos, os quais foram desenvolvidos tendo por base técnicas de correlação e de regressão múltipla linear.

Modelo de regressão múltipla

O desenvolvimento do modelo baseou-se na aplicação de técnicas de regressão estatística múltipla linear. O modelo de regressão convencional (equação 1) descreve uma relação entre as k variáveis independentes (ou regressores) x_i e a variável dependente. Neste trabalho a velocidade segura (V_s) apontada pelos observadores especialistas foi considerada como a variável dependente do modelo, sendo introduzidas as 14 variáveis caracterizadoras do trecho e sua envolvente como variáveis independentes.

$$V_s = B_0 + B_1 x_1 + B_2 x_2 + \dots + B_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

Onde:

- V_s : Velocidade segura estimada [km/h]
- B_0 : Coeficiente independente
- B_j : com $j = 1, \dots, k$ são os coeficientes de regressão (parciais) associados às variáveis x_j
- x_i : variáveis independentes, com $j = 1, \dots, k$,
- ε : é o erro aleatório.

Os parâmetros β_j , $j = 1, \dots, k$, representam a variação esperada na resposta V_s para cada unidade de variação em x_j quando todos os restantes regressores x_i ($i \neq j$) são considerados constantes em termos experimentais. Como medida de avaliação da qualidade do ajuste do modelo foi considerado o valor do coeficiente de determinação ajustado ($R_{Ajust.}^2$), o qual representa um indicador mais robusto que o coeficiente de determinação dando uma melhor ideia da proporção da variação da variável de resposta V_s que é explicada pela equação de regressão já que tem em conta o número de regressores envolvidos.

Os trabalhos de modelação iniciaram-se através da introdução de todas as variáveis no modelo, sendo posteriormente avaliado o efeito associado à eliminação combinada de algumas das variáveis. A amostra global integrou 450 casos por condutor (correspondentes aos 45k m x 5 (segmentos de 200m) x 2 (2 sentidos de circulação)) o que totalizou 1800 casos de estudo. Os resultados obtidos e a robustez da relação foram sendo avaliados progressivamente tendo por base os indicadores de ajustamento do modelo e da coerência dos resultados designadamente através da análise do sinal associado aos coeficientes de regressão parciais. Para além do coeficiente de determinação ajustado, foram ainda tidos em consideração o peso assumido por cada variável (β - parâmetro com os dados normalizados) e o correspondente nível de significância (*p-value*). O modelo final seleccionado representa o modelo que, sem perda significativa da capacidade de ajuste aos valores observados (diminuição do $R_{Ajust.}^2$), inclui unicamente as variáveis mais robustas e que se revelaram estatisticamente significativas, de forma consistente, na maioria dos modelos desenvolvidos.

O desenvolvimento do modelo recorreu a técnicas de regressão estatística múltipla, sendo que numa 1ª fase foram introduzidas todas as variáveis recolhidas, sendo posteriormente avaliados os resultados estatísticos obtidos, robustez do modelo e a sua coerência com a realidade e com os valores e relações expectáveis;

Posteriormente foram sendo progressivamente desenvolvidos novos modelos onde o número de variáveis introduzidas representava um subconjunto do global. O indicador de qualidade adoptado para comparação dos modelos finais, foi o coeficiente de determinação (r^2), o peso assumido por cada variável (β) e correspondente nível de significância (*p-value*).

O modelo final seleccionado representa o modelo que sem perda significativa da capacidade de ajuste aos valores observados (diminuição do r^2), inclui unicamente as variáveis mais robustas e que se revelaram estatisticamente significativas na maioria dos modelos desenvolvidos.

Os primeiros modelos de regressão linear múltipla assentaram no uso da informação o mais desagregada possível e considerando todas as variáveis independentes, segregadas em função do sentido de tráfego.

O modelo desagregado foi desenvolvido para cada um dos quatro observadores (A, B, C e D) tendo por base o método regressivo, tendo-se retirado progressivamente do modelo as variáveis que não apresentaram significância estatística ao nível de confiança de 5%.

Os resultados obtidos (ver Tabela1) mostram uma grande consistência dos resultados entre os modelos relativos aos 4 especialistas. À excepção do observador D, os coeficientes de determinação dos quatro modelos são bastante próximos, compreendidos entre 0,6 e 0,65. Foi possível verificar que,

independentemente do modelo, todos os coeficientes associados às variáveis eram negativos, demonstrando que o efeito de cada variável no valor do limite de velocidade do trecho é penalizador.

De facto, o coeficiente independente, varia entre os 82,82 e os 89,54, valores bastante próximos dos 90 Km/h, demonstrando que esse valor máximo foi considerado pelo modelo como valor de referência.

Tab. 1. Modelo I: todas as variáveis desagregadas por sentido de tráfego.

Modelo	MODELO I.A		MODELO I.B		MODELO I.C		MODELO I.D	
Observador	Obs. A		Obs. B		Obs. C		Obs. D	
Coef. determinação	R ² =0,6284		R ² =0,6078		R ² =0,6591		R ² =0,5163	
Coef. Independente	A = 86,17		A = 84,13		A = 89,54		A = 82,82	
	B	β	B	β	B	β	B	β
V _{1D}	-4,25	-0,15	-4,65	-0,16	-2,53	-0,11	-4,48	-0,19
V _{1E}	-3,21	-0,11			-2,38	-0,10	-5,33	-0,22
V _{2D}			-1,51	-0,08				
V _{2E}								
V _{3D}	-1,45	-0,13	-1,09	-0,09	-1,22	-0,13	-1,70	-0,18
V _{3E}	-1,35	-0,12	-1,40	-0,12	-1,33	-0,15	-1,85	-0,20
V _{4D}								
V _{4E}					-0,48	-0,06		
V _{5D}								
V _{5E}								
V _{6D}								
V _{6E}								
V _{7D}								
V _{7E}			-5,00	-0,10				
V ₈					-3,02	-0,08		
V _{9D}								
V _{9E}								
V _{10D}			-5,15	-0,10				
V _{10E}	-6,31	-0,13						
V _{11D}								
V _{11E}								
V _{12D}	-4,99	-0,11			-5,77	-0,16	-5,25	-0,14
V _{12E}	-4,77	-0,11					-7,44	-0,20
V _{13D}	-7,64	-0,18	-13,57	-0,31	-4,87	-0,14	-3,80	-0,11
V _{13E}	-5,18	-0,13	-9,10	-0,21	-4,25	-0,13		
V _{14D}	-7,43	-0,16	-11,42	-0,23	-7,29	-0,19		
V _{14E}	-5,51	-0,12	-5,85	-0,12	-7,80	-0,21		

O modelo relativo ao observador D foi o que obteve menor coeficiente de determinação. Contudo, é notória a consistência das variáveis independentes nos quatro modelos, o que releva a robustez dessas variáveis enquanto variáveis explicativas da velocidade. As variáveis relativas aos diferentes tipos de acessos revelaram-se de forma geral, estatisticamente significativas, assim como as relativas ao grau de restrição lateral e a existência de passeio.

Face à consistência dos resultados relativos aos diferentes especialistas, optou-se por construir um novo modelo relativo à amostra global. Os resultados estão sintetizados na Tabela 2, sendo que, tal como seria expectável o aumento da dimensão da amostra e do número de observadores, se traduz num aumento da dispersão dos valores e, por consequência, numa diminuição do nível de ajustamento.

Tab.2. Modelo II e III: total das observações.

MODELO	MODELO II.T		MODELO III.T	
Observador	A, B, C e D		A, B, C e D	
Coefficiente de determinação	R ² =0,5574		R ² =0,5608	
Coefficiente Independente	A = 85,85		A = 85,94	
	B	β	B	β
V _{1D}	-4,00	-0,15	-3,52	-0,21
V _{1E}	-3,16	-0,12		
V _{2D}	-0,88	-0,05	-0,78	-0,08
V _{2E}				
V _{3D}	-1,37	-0,13	-1,44	-0,23
V _{3E}	-1,52	-0,14		
V _{4D}				
V _{4E}				
V _{5D}				
V _{5E}				
V _{6D}			0,27	0,05
V _{6E}				
V _{7D}			-1,30	-0,05
V _{7E}	-2,90	-0,06		
V ₈				
V _{9D}			-4,23	-0,04
V _{9E}				
V _{10D}			-1,66	-0,06
V _{10E}				
V _{11D}				
V _{11E}				
V _{12D}	-4,71	-0,11	-3,94	-0,17
V _{12E}	-3,98	-0,10		
V _{13D}	-7,14	-0,18	-5,89	-0,23
V _{13E}	-4,60	-0,12		
V _{14D}	-6,18	-0,14	-5,19	-0,20
V _{14E}	-4,49	-0,10		

Assim o coeficiente de determinação desceu para os 0,55 e 0,56 consoante se introduzam as variáveis desagregadas por sentido de circulação ou de forma agregada.

Mais uma vez, todos os coeficientes de regressão se apresentam negativos, sendo os coeficientes independentes de ambos os modelos se aproximam de 86. Os coeficientes de determinação destes modelos situam-se entre os valores máximos e mínimos obtidos para os quatro modelos idênticos,

construídos com as observações isoladas de cada um dos observadores. Comparando ainda com os modelos obtidos para as observações isoladas de cada um dos observadores, denota-se uma certa semelhança ao nível dos regressores considerados nos modelos, sendo que as variáveis caracterizadoras das condições de restrição lateral e os acessos aos espaços marginais, são as variáveis que de forma consistente se mantêm em todos os modelos.

A análise dos resíduos, mostrou que de forma geral, a sua distribuição segue de perto a distribuição normal, não tendo sido detectada uma forma padrão muito evidente na análise individualizada entre os valores dos resíduos e os valores das variáveis independentes.

Também a análise da colinearidade entre as variáveis independentes mostrou que as correlações encontradas não são muito significativas (inferiores a 0,8 normalmente considerado como valor limite).

Modelo de escolha discreta

Numa segunda fase recorreu-se à aplicação de um modelo de escolha discreta (Multinomial Logit, MNL) à mesma amostra recolhida (Correia e Bastos Silva, 2011).

O modelo de escolha discreta é baseado na teoria da utilidade estocástica onde a selecção da opção é com vista a maximizar a função utilidade (Ben-Akiva and Lerman 1985).

O modelo foi desenvolvido assume a globalidade dos dados associados aos 4 especialistas, assumindo os 90km/h como valor de referência, já que representa a velocidade máxima legal admissível em domínio extra-urbano (grau de conflituosidade nulo). Nessa óptica, os coeficientes associados às variáveis explicativas procuram explicar se, em alguns trechos, essa velocidade máxima não pode ser aplicada e portanto deve ser reduzida, procurando identificar os factores que contribuem de forma significativa para essa redução.

A expressão da utilidade associada a cada alternativa é dada pelas seguintes relações:

$$\begin{aligned}
 V(50km/h) &= \beta_{50km/h} + \sum_{k=1}^{K_{50km/h}} \beta_{k50km/h} x_k \\
 V(70km/h) &= \beta_{70km/h} + \sum_{k=1}^{K_{70km/h}} \beta_{k70km/h} x_k
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$V(90km/h) = 0 \text{ (alternativa de referência)}$$

Onde:

$V(i)$ – é a utilidade associada à alternativa i

β_i – coeficiente independente associado à alternativa i

x_k – variável explicativa

β_{ki} – coeficiente associado à variável independente x_k , na função utilidade da alternativa i

k é o numero de variáveis estatisticamente significativas em cada uma das funções de utilidade.

O modelo MNL foi calibrado pelo método da máxima verosimilhança. Inicialmente foram utilizadas todas as variáveis independentes, sendo posteriormente retiradas de forma sequencial as variáveis que não se mostraram estatisticamente significativas ao nível de significância de 95%, de modo a aumentar a sua robustez final. As variáveis integradas nos modelos finais encontram-se listadas na Tabela 3, obtendo-se um factor de determinação próximo dos 0,75.

Tab. 3. Modelo Nlogit – variáveis e coeficientes.

50km/h (31 mph) utility coefficients					70km/h (43 mph) utility coefficients				
Variable	β	Error	b/St.Er.	P[Z >z]	Variable	β	Error	b/St.Er.	P[Z >z]
50 β	-4.8718738	0.272427	-17.883	0	70 β	-1.61747	0.108711	-14.879	0
50V _{1D}	1.7447783	0.243386	7.169	0	70V _{1D}	1.177034	0.187543	6.276	0
50V _{1E}	1.134925	0.24666	4.601	0	70V _{1E}	0.815354	0.192474	4.236	0
50V _{2D}	1.6783118	0.548602	3.059	0.002	70V _{2D}	1.469388	0.543414	2.704	0.006
50V _{3E}	0.6977915	0.124223	5.617	0	70V _{3E}	0.56881	0.107973	5.268	0
50V _{4D}	0.6925528	0.285952	2.422	0.015	70V _{4D}	0.707993	0.283828	2.494	0.012
50V _{7D}	Sem significância estatística				70V _{7D}	0.582572	0.240676	2.421	0.015
50V ₈	2.4503854	0.554731	4.417	0	70V ₈	1.280334	0.521868	2.453	0.014
50V _{12D}	1.6494969	0.429992	3.836	0	70V _{12D}	1.078103	0.384057	2.807	0.005
50V _{12E}	0.963828	0.256635	3.756	0	70V _{12D}	Sem significância estatística			
50V _{13D}	2.3500044	0.332376	7.07	0	70V _{13D}	1.118558	0.240794	4.645	0
50V _{13E}	1.1227972	0.324544	3.46	0	70V _{13E}	0.78378	0.225329	3.478	0
50V _{14D}	2.883553	0.584119	4.937	0	70V _{14D}	1.513124	0.528942	2.861	0.004
50V _{14E}	3.4173367	0.800166	4.271	0	70V _{14E}	3.080085	0.752934	4.091	0

Mais uma vez, os resultados finais são bastante consistentes, sendo que, tal como expectável, os coeficientes associados à utilidade da alternativa de 50km/h são superiores aos da alternativa de 70km/h. De facto a existência de intersecções (lado direito e esquerda) aumenta a utilidade em baixar o limite de velocidade relativamente aos 90km/h, sendo essa utilidade mais acentuada na alternativa de 50km/h relativamente à de 70km/h. Esta tendência, é de forma geral consentânea em todas as variáveis apresentadas como estatisticamente significativas.

As passagens de peões revelam-se significativamente mais relevantes na utilidade associada a 50km/h, pelo que, de forma geral, a sua presença está associada a meios urbanos, onde se justifica a redução do limite máximo legal a 50km/h.

Também a existência de passeio do lado direito se revelou estatisticamente significativa nas duas funções utilidade, mostrando que a sua existência de associa a limites inferiores a 90km/h. A existência de passeio do lado esquerdo revela-se unicamente significativa na função utilidade de 50km/h, mostrando que em meios onde seja expectável a presença significativa de peões, justifica o abaixamento do limite legal para esse valor.

Também o MNL aponta as variáveis relativas às restrições laterais como muito significativas, sendo os coeficientes mais elevados associadas às restrições elevadas, independentemente se do lado direito e/ou esquerdo. É ainda de salientar que as variáveis se relevam mais importantes quando associadas ao

lado direito relativamente ao lado esquerdo, demonstrando que os condutores são mais sensíveis aos potenciais conflitos localizados do lado associado ao sentido da condução.

A análise de colinieridade mostrou que as variáveis integradas no modelo não assumem níveis de correlação elevados, sendo o maior valor obtido entre as variáveis.

Síntese comparativa

Este capítulo apresentou de forma sucinta a aplicação de duas metodologias distintas para responder ao mesmo objectivo final. A primeira abordagem, baseada na aplicação de técnicas de regressão múltipla, resultou num modelo contínuo que dificulta a sua aplicação directa, designadamente sempre que o modelo aponta para valores intermédios. Essa dificuldade é particularmente evidente na Figura 6.

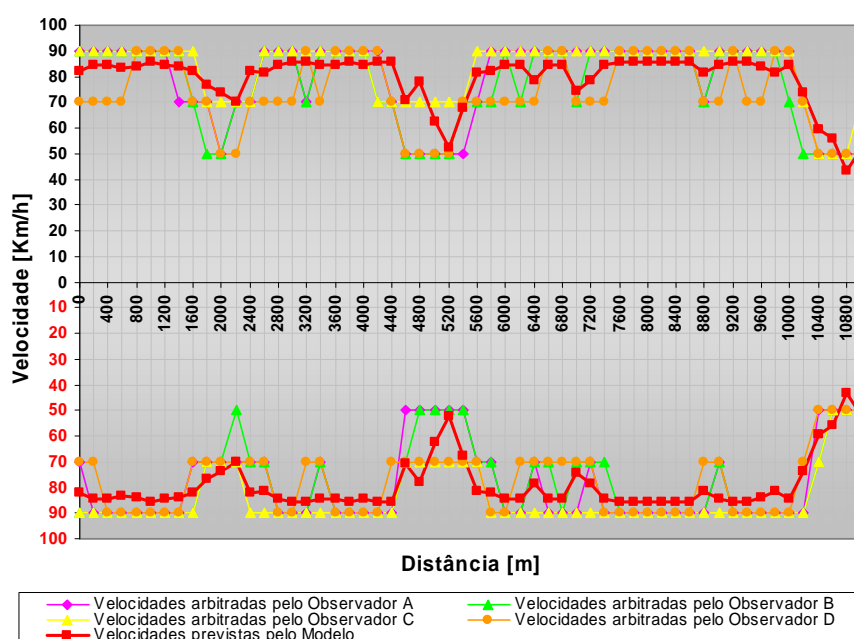


Fig.6. Comparação entre velocidades apontadas pelos 4 especialistas e velocidades estimada.

Nessa óptica, o modelo de escolha discreta parece constituir uma metodologia mais adequada à resolução do problema. A sua aplicação aponta para cada secção, qual o patamar de velocidade de velocidade (50, 70 ou 90 Km/h) que assegura maior utilidade.

Apesar disso, verifica-se que os resultados da modelação são de forma geral consistentes, identificando as restrições laterais e o número de acessos (diferentes tipologias) como as variáveis mais relevantes na explicação do limite máximo mais adequado.

PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A gestão da velocidade tem vindo ao longo das duas últimas décadas a revelar-se central a qualquer política de segurança rodoviária. O ambiente inter-urbano e atendendo à variabilidade de ambientes envolventes que estas vias tendem a atravessar exige cada vez mais que o estabelecimento dos correspondentes limites legais de velocidade, se reja por uma análise multifuncional e integrada, onde

para além das características da estrada também o ambiente envolvente condicione os comportamentos dos condutores. Este trabalho procurou apresentar um contributo nesse sentido.

Mais do que o desenvolvimento de um modelo validado, o trabalho procurou definir uma metodologia de trabalho capaz de produzir um modelo robusto para apoio à definição dos limites legais, tendo por base um conjunto limitado de variáveis caracterizadoras do ambiente rodoviário onde se insere o trecho em estudo.

Os modelos desenvolvidos assentaram em duas metodologias distintas: (i) técnicas de regressão múltipla linear; (ii) modelos de escolha discreta (MNL). A segunda metodologia parece constituir uma ferramenta mais adequada ao problema em causa, na medida em que selecciona a alternativa com maior utilidade, dentro do conjunto das alternativas em jogo. Independentemente da metodologia adoptada, os resultados obtidos mostraram-se bastante consistentes, evidenciando a importância das variáveis associadas quer às “restrições laterais” à via (proximidade ou afastamento edificações ou outro tipo de ocupações) e do número de acessos à faixa de rodagem (entradas de garagens, de parques de estacionamento, acessos a logradouros, etc.).

É possível concluir que os dois modelos desenvolvidos tendem a apresentar um nível de robustez bastante aceitável, constituindo-se desde já como ferramentas de apoio à gestão das velocidades em vias 1x1 que atravessem diferentes ambientes rodoviários e diferentes tipos de uso, sendo que a sua aplicação, poderá representar um contributo para a uniformização dos tratamentos, face a problemas similares.

Finalmente importa referir que independentemente da qualidade dos modelos desenvolvidos ou a serem desenvolvidos, dificilmente se conseguirá definir um procedimento de aplicação suficientemente simples que responda à diversidade e complexidade das situações reais existentes, pelo que importa reconhecer que os modelos de gestão da velocidade se afiguram como ferramentas essenciais e centrais à definição de uma estratégia coerente e fidedigna de imposição de limites legais adaptados as exigências e características locais, não devendo, contudo, dispensar de forma complementar e crítica, a avaliação e a intervenção directa humana.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto SAFESPEED - *Speed management strategies: an instrument for the implementation of safe and efficient road management solutions*, projecto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia do Ministério da Ciência e Tecnologia e Ensino Superior.

REFERÊNCIAS

ANSR@ (2009): <http://www.ansr.pt/>

Ben-Akiva, M.E. and Lerman, S.R., *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*, MIT Press series in transportation studies, 9, MIT Press, Cambridge 1985.

Cirillo, J.A., *Interstate System Accident Research—Study II—Interim Report II*, Public Roads, Vol. 35, No.3, 1968.

DfT, *Development of a Rural Road Hierarchy for Speed Management* - January, Pub: Department for Transport, UK 2002.

- DfT., Setting Local Speed Limits - DfT Circular 01/2006, August, Pub: Department for Transport, UK 2006.
- Donald, D., Using Expert System Technology to Set Appropriate, Consistent Speed Limits—The Australian Experience. In Proc., Third International Conference on Safety and the Environment in the 21st Century: Lessons from the Past, Shaping the Future, Tel Aviv, Israel 1994.
- Especial Report 254: Managing Speed – Review of current practice for setting and enforcing speed limits, Transportation Research Board, National Academy Press. Washington DC, 1998, 427p.
- Fildes, B. et al., Balance between harm reduction and mobility in setting speed limits: a feasibility study, Austroads publication AP-R272/05, Sydney, Australia 2005.
- Fitzpatrick, K. Krammes, R.A., Fambro, D.B., Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Relationships. ITE Journal, Vol. 67, No.2, 1997.
- Correia G. H.A.; Bastos Silva, A. M. C – “Setting speed limits in rural two-lane highways by modelling the relationship between expert judgment and measurable road-side”, Journal of Transportation Engineering from the ASCE – Vol.137, No.3, March 2011
- Greibe, P., Nilsson, P.K., Herrstedt, L., Speed Management in Urban Areas, A framework for the planning and evaluation process, 1999.
- Harwood, C.J., Criteria for Setting General Urban Speed Limits, Road and Transport Research, Vol. 4, No.2, 1995.
- Joscelyn, K.B., Elston, P.A., Maximum Speed Limits - Volume II, The Development of Speed Limits: A Review of the Literature, FH-11-7275, Indiana University, Bloomington 1970.
- Mackey, P., Context-sensitive design for rural speed management - Congrès Annuel de 2004 de l'Association des Transports du Canada, Quebec-Canada 2004.
- Neuman, T. et al., A Guide to Best Practices for Achieving Context Sensitive Solutions - NCHRP Report 480, TRB 2002.
- Oppenlander, J.C. A Theory on Vehicular Speed Regulation. Bulletin 341, Highway Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1962.
- RTI., Speed and Accidents, Vol.II, Final Report, Summary and Conclusions, 1970.
- Solomon, D., Accidents on Main Rural Highways Related to Speed, Driver, and Vehicle, Bureau of Public Roads, U.S. Department of Commerce, 1964.
- Stamatiadis, N., A European Approach to Context Sensitive Design - Transportation Quarterly, V.55, N.4, pp 41-48, 2001.
- Stuster, J.; Coffman, Synthesis of Safety Research Related to Speed and Speed Management; Pub: FHWA-RD-98-154, July, FHWA, 1998.
- Van den Hoogen, E., and Smulders, S., Control by Variable Speed Signs: Results of the Dutch Experiment, Conference Publication 391, Road Traffic Monitoring and Control, April 26–28, IEE, 1994.

CONTROLO DA VELOCIDADE EM ZONAS DE APROXIMAÇÃO, TRANSIÇÃO E URBANA

Ana M. Bastos Silva*

Sílvia Santos

Universidade de Coimbra, Depart. Eng^a Civil - Coimbra, Portugal

E-mail: abastos@dec.uc.pt

RESUMO

Desde os tempos ancestrais que as estradas representam a espinha dorsal do ordenamento do território. Actualmente, muitas dessas estradas atravessam localidades, representando, cada vez mais, pontos críticos em termos de segurança e funcionalidade, na medida em que devem integrar no mesmo espaço, exigências de mobilidade ligadas ao tráfego de atravessamento e de resposta às actividades e acessibilidade local. O presente artigo pretende contribuir para a solução deste problema, assentando na definição de soluções padrão com potencial de aplicação em trechos de atravessamento de localidades, tendo por base o tráfego médio diário anual (TMDa), as restrições do espaço canal, assim como a extensão do trecho em estudo.

INTRODUÇÃO

Os trechos de atravessamentos de localidades, por parte de estradas nacionais ou regionais, representam em Portugal, uma preocupação crescente por parte das autoridades oficiais. Este tipo de estradas assegura frequentemente, por um lado, a ligação principal entre dois meios urbanos e, por outro lado, o acesso aos espaços adjacentes, respondendo às necessidades locais. Nesse contexto, esta mistura de funções associadas à mobilidade e à acessibilidade local está frequentemente na base da geração de conflitos entre os vários utilizadores envolvidos no espaço público, quer estes sejam veículos ligeiros, pesados, ciclistas, peões e até mesmo veículos agrícolas que possam circular neste meio (Cupolillo, 2006).

O tipo e gravidade de conflitos originados em meio urbano dependem de diversos factores, destacando-se pela sua importância, a velocidade, o volume de tráfego e as características locais. Estas últimas estão directamente relacionadas com a dinâmica local, traduzindo-se frequentemente, entre outros factores, através da densidade habitacional, do número de travessias pedonais, existência ou não de passeios ou de bermas e, das características básicas dos peões e ciclistas (presença significativa de idosos e crianças).

São vários os autores (OECD/ECMT, 2006; TRB, 1998) que defendem que a velocidade representa um factor determinante quer na explicação da frequência, quer na gravidade dos acidentes, sendo que segundo o MAI (2003) a velocidade está, de forma directa ou indirecta, na base da maioria dos acidentes em Portugal.

De facto a velocidade afecta o comportamento do condutor através da alteração das suas características visuais e cognitivas, agravado pelo aumento da frequência de tomada de decisões.

Também no caso dos atropelamentos, a velocidade do veículo é factor determinante na gravidade dos ferimentos originados (Fig. 1), sendo que a probabilidade de sobrevivência do peão diminui exponencialmente com o aumento da velocidade do veículo (ETSC, 2008). Para velocidades superiores a 60 km/h a probabilidade do peão sobreviver sem danos graves e irreversíveis é praticamente nula.

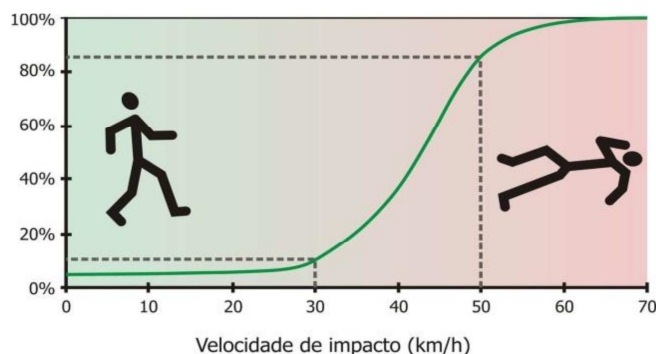


Fig. 1. Influência da velocidade na probabilidade de morte por atropelamento
(adaptado de ETSC, 2008).

Importa assim garantir a criação de ambientes rodoviários seguros, actuando-se ao nível operacional, de acordo com os seguintes objectivos prioritários: salvaguarda da prática de velocidades seguras, segurança dos utilizadores vulneráveis e existência de uma infra-estrutura rodoviária segura e auto-explicativa, sem contudo por em causa a sustentabilidade económica dos espaços intervencionados. É neste contexto que surgem as técnicas de acalmia de tráfego, as quais integram um conjunto alargado de medidas físicas que actuam sobre a infra-estrutura e procuram salvaguardar a segurança ao longo do trecho intervencionado, apostando na redução da velocidade e dos volumes do tráfego automóvel, e na compatibilização da utilização do espaço público pelos diferentes utilizadores.

Nesta perspectiva, o tratamento dos trechos de atravessamento de localidades, pelos problemas característicos que apresentam e pelas diversas funções que têm de assegurar, afigura-se como um dos domínios privilegiados de aplicação deste tipo de técnicas. No entanto, a diversidade de problemas e de especificidades locais faz com que cada troço de atravessamento apresente uma identidade própria e justifique o desenvolvimento de uma solução única. Defende-se, contudo, ser possível identificar um conjunto de soluções que, embora flexíveis, possam constituir soluções de referência. Nessa linha de acção, o presente documento centra-se na definição de um conjunto limitado de soluções padrão, procurando cobrir a generalidade dos problemas e condicionantes tipificáveis em atravessamentos de localidades.

CARACTERIZAÇÃO DOS TRECHOS DE ATRAVESSAMENTOS DE LOCALIDADES

Os trechos de atravessamento de localidades, por parte de estradas nacionais e regionais, representam um problema actual ao nível da segurança rodoviária, justificando mais de 17% dos acidentes e 21% dos mortos, vítimas de acidentes rodoviários em Portugal (ANSR, 2010).

Esses problemas devem-se maioritariamente ao confronto entre diferentes interesses os quais se revelam de forma geral, antagónicos entre si. Por um lado, a necessidade de responder às exigências do tráfego de atravessamento, traduzidas em termos de necessidades de rapidez e fluidez dos

movimentos automóveis, sendo esta exigência tanto mais relevante quanto mais importante forem os níveis de procura de tráfego envolvidos. Por outro lado, as necessidades de assegurar o desenvolvimento económico local através da valorização das actividades, vivência e funcionalidade local.

Esta mistura de funções, nem sempre pacífica entre si, traduz-se em diversos impactes negativos para a sociedade em geral, destacando-se os de nível social, ambiental e económico. Independentemente das dimensões da localidade, tem-se vindo a assistir à perda das funções de lazer e de convívio resultando, conseqüentemente, em alterações da vivência urbana (Bastos Silva e Seco, 2008; Hallmark et al, 2007; Herrstedt, 1993).

Importa ainda ter presente que, na maioria dos casos, as localidades se desenvolvem ao longo da via, constituindo esta a “Rua principal”, onde se situa a maior parte do comércio local, serviços, equipamentos e muitas habitações (DHV Environment and Transportation, 2005). Estas vias apresentam-se habitualmente com grandes alinhamentos rectos e perfis transversais alargados, constituídos por múltiplas vias e bermas de grandes dimensões, potencializando a prática de velocidades elevadas.

Genericamente, os problemas mais característicos dos atravessamentos de localidades prendem-se com questões de velocidade e volumes e tipo de tráfego que os procuram, sendo que, à medida que estes dois indicadores aumentam, aumentam igualmente os problemas de segurança e de barreira social.

Identificação das zonas problema – Indicadores

A identificação das zonas problema deve ser suportada pela definição de indicadores, preferencialmente quantitativos, que permitam avaliar de forma objectiva os problemas de segurança, de funcionalidade e de operacionalidade envolvidos. São normalmente consideradas zonas com potencial risco, as zonas com grande ocupação marginal, onde as exigências de mobilidade e de acesso local originem conflitos do tipo veículo-veículo, peão-veículo ou ciclista-veículo (Bastos Silva et al, 2004).

Este é um assunto ainda muito pouco explorado em termos técnico-científicos, sendo maioritariamente as intervenções accionadas na sequência de participações ou contestações populares, por vezes baseadas em factores subjectivos ligadas ao “sentimento de risco”.

Importa contudo definir um conjunto lógico e limitado de indicadores que permitam, de forma objectiva e fundamentada, hierarquizar os locais a intervir. Tais indicadores, deverão justificar uma análise ponderada de um conjunto de indicadores que se prendem com aspectos operacionais e de segurança, como a tipologia e taxa de acidentes, as velocidades médias (ou percentil 85 da distribuição das velocidades), eventualmente complementada por outros indicadores de exposição ao risco (Bastos Silva et al, 2004).

Tipologia e taxa de acidentes

O número de acidentes é normalmente considerado como o indicador mais relevante. Nas suas diferentes formas, importa que este indicador incorpore um factor de risco, tal como a taxa de acidentes por unidade de distância percorrida, por volumes de tráfego ou dimensão da população

envolvida. De acordo com o National Roads Authority (2005), considera-se prioritário intervir sempre que a taxa de acidentes é superior a 5 PIA/10⁶ km (acidentes com feridos por cada milhão de quilómetros percorridos) ou a 2 PIA/1000 hab./ano.

Em Portugal, essa necessidade está directamente relacionada com a identificação de “ponto negro”, ou seja, trechos de estrada, no máximo com 200 m, onde tenham ocorrido pelo menos 5 acidentes anuais com vítimas e cuja soma de indicadores de gravidade seja superior a 20 (ANSR, 2010).

A tipologia de acidentes é também um factor a ter em conta na análise. Considera-se que os locais onde ocorram acidentes que envolvam peões, mesmo que em número limitado, por constituírem situações muito graves, devem justificar a intervenção.

Velocidade

A velocidade, pelo efeito que assume na frequência e gravidade dos acidentes, deve igualmente constituir um factor a ter em conta. Os trechos onde a média e o percentil 85 da distribuição das velocidades ultrapasse 10 km e 20km/h, respectivamente o limite legal do valor estabelecido para o local, devem ser constituídos como potenciais “zonas problema”.

Exposição ao risco

A exposição ao risco do peão versus veículo é outro indicador importante a ter em consideração. As normas inglesas (TD 28/87), usam o indicador de risco PV^2 para averiguar a adequação da tipologia de atravessamentos pedonais em zonas urbanas, onde P representa o fluxo horário pedonal e V o de veículos). A mesma fonte defende que as medidas de apoio ao peão se revelam necessárias para valores do indicador superiores a 10⁸ (associado a $P > 50$ peões/h ou $V > 450$ veic/h).

Outros indicadores

Entre outros factores, identifica-se a opinião expressa pela população local e a necessidade programada de se intervir no eixo viário. De facto, as contestações e participações da população são normalmente o primeiro indicador da existência de problemas de segurança, ou disfunções hierárquicas. O sentimento ou sensação de insegurança é um indicador subjectivo, maioritariamente baseado na auscultação da população local, normalmente suportada por inquéritos locais.

Também a necessidade de se intervir fisicamente num determinado trecho, seja em termos de repavimentação, ou de beneficiação de infraestruturas, pode ser considerado como uma oportunidade para requalificar e melhorar o desempenho do eixo, designadamente através da aplicação de medidas de acalmia de tráfego.

GESTÃO DA VELOCIDADE EM TRECHOS DE ATRAVESSAMENTO DE LOCALIDADES

As estradas nacionais e regionais caracterizam-se por atravessar diferentes ambientes rodoviários que vão desde o puro rural, até ao ambiente urbano, onde interagem diferentes utilizadores. É assim expectável e defensável que a velocidade legal máxima a atribuir a esses diferentes ambientes rodoviários, deva sugerir níveis de conflituosidade.

De modo a simplificar o tratamento da infraestrutura, optou-se no âmbito do presente trabalho por limitar os valores máximos a três patamares dependendo do ambiente rodoviário envolvido: 90km/h como representativo do puro rural; 70km/h como representativo do ambiente de transição entre rural e urbano, traduzido de forma geral por habitação dispersa e afastada da faixa de rodagem; e 50km/h como representativo do ambiente puramente urbano, onde interagem diferentes utilizadores e interesses.

DEFINIÇÃO DE PROPOSTAS DE SOLUÇÕES PADRÃO

Ambientes rodoviários a tratar

Na sequência do apresentado anteriormente, optou-se para efeito do tratamento dos eixos, por subdividir o trecho de atravessamento em três zonas fundamentais (Figura 2): aproximação, transição e urbana (National Roads Authority, 2005).

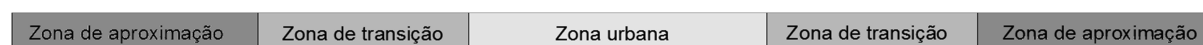


Fig. 2. Definição das diferentes zonas de um atravessamento de localidade.

A zona de aproximação tem por objectivo alertar o condutor para a entrada num ambiente com características e exigências acrescidas, particularmente quando comparadas com o ambiente rural.

A zona de transição situa-se entre a zona de aproximação e a zona urbana, caracterizando-se por possuir marginalmente alguns edifícios (habitações, comércio, equipamentos ou serviços), ainda que de forma dispersa. A passagem da zona de aproximação para a zona de transição está normalmente associada a um portão de entrada na localidade.

Finalmente, a zona urbana caracteriza-se por apresentar uma forte presença de utilizadores vulneráveis, assim como um nível de conflituosidade elevado, relacionado com manobras de mudança de direcção e a prática de estacionamento. Neste caso devem adoptar-se medidas, tanto visuais como físicas, para se obter uma velocidade compatível com as exigências do ambiente rodoviário e reduzir potenciais pontos de conflito, como escolas ou outros equipamentos, comércio, intersecções com outras vias, etc. (Cupolillo et al., 2007). A velocidade adoptada para este trecho poderá, no máximo, ser de 70 km/h, adoptando-se normalmente os 50 km/h.

Tratamento da zona de aproximação

A zona de aproximação marca o início da intervenção. O tipo de medidas a aplicar não pretende impor reduções acentuadas à velocidade, mas sobretudo alertar o condutor para a aproximação de um troço com características e exigências distintas.

Esta zona integra-se normalmente no espaço rural que antecede o espaço urbano. Dentro das medidas mais aplicadas, identifica-se o estreitamento das vias e das bermas reforçados pela aplicação de elementos complementares, sejam pela introdução alterações ao tipo de pavimento formalizando lombas virtuais, seja pela utilização de sinalização horizontal (marcas no pavimento), designadamente de bandas cromáticas com espaçamentos degressivos à medida que se aproxima do final da zona de aproximação (ver Fig. 3).



Fig. 3. Marcação de bandas cromáticas na zona de aproximação.

Outra solução alternativa ainda não utilizada em Portugal, mas que começa a ganhar grande expressão no estrangeiro, nomeadamente em Itália, no Reino Unido e na Austrália, são os *dentes de dragão*. Esta solução consiste na pintura de triângulos no pavimento (similares a dentes), que aumentam o seu comprimento à medida que se aproximam do local de conflito (Fig. 4). Esse aumento da dimensão do dente pretende acentuar o efeito de estrangulamento, induzindo à moderação da velocidade por parte do condutor. Esta solução é normalmente recomendada para a zona de aproximação, designadamente no imediatamente antes do portão de entrada, sendo composta por 17 pares de “dentes”, numa extensão global de cerca de 37 m. O comprimento dos “dentes” varia entre 60 cm e 1 metro (17º triângulo), com incrementos entre si de 2,5 cm. O espaçamento recomendável entre triângulos é de 1,5 metros e a base é de 75 cm. Estes deverão ainda ser afastados da guia e do eixo da via em 10 cm (Department for Transport 2000).

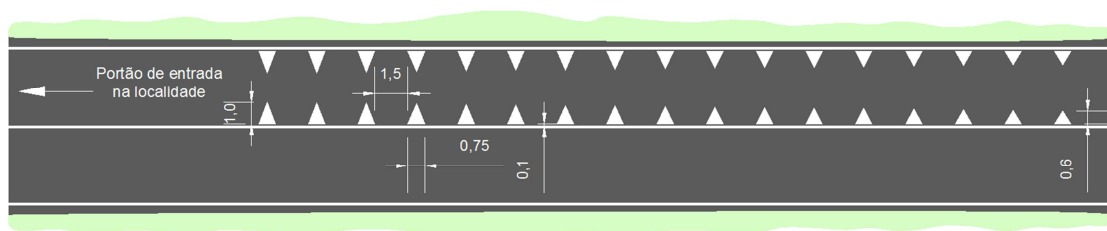


Fig. 4. Dentes de dragão (baseado em Department for Transport 2000).

Esta zona de aproximação deve culminar num portão de entrada, o qual deverá alertar o condutor para a alteração do ambiente rodoviário.

A utilização de elementos verticais isoladamente ou em complemento a elementos horizontais é igualmente benéfica, dando notoriedade ao portão de entrada, assim como a alteração da textura ou coloração do pavimento e marcação de raias. As alterações dos alinhamentos horizontais podem ser conseguidas através da introdução de uma gincana, associada a um separador central sendo que, no caso de existir no local uma intersecção com a via principal, poder-se-á recorrer à formalização de um cruzamento prioritário.

A associação de iluminação pública, mesmo que limitada à secção do portão de entrada é considerada recomendável, enfatizando a entrada no ambiente urbano. Em alternativa, e idealmente, a iluminação deverá prolongar-se de forma contínua, através da zona de transição (ver pontos 4.3 e 4.7). Também a

utilização de lombas virtuais se tem revelado extremamente benéfica, induzindo no condutor uma ilusão de elevação e estreitamento óptico (ver Fig. 5 e Fig. 6).



Fig. 5. Local de implementação do portão de entrada antes da intervenção.

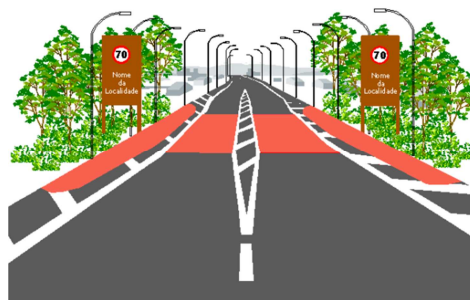


Fig. 6. Local de implementação do portão de entrada depois da intervenção.

Sempre que se utilizem árvores, postes de iluminação ou postes de sinalização, importa que os mesmos sejam frágeis de modo a evitar agravar as consequências de eventuais acidentes, em caso de despiste. A utilização de elementos rígidos não protegidos só é considerada admissível a distâncias superiores a 10 m da faixa de rodagem.

Tratamento da zona de transição

A zona de transição corresponde, em geral, a um ambiente sub-urbano caracterizado pela presença de edificações distribuídas de forma dispersa. Localiza-se assim, no trecho imediatamente a seguir ao portão de entrada, fazendo a transição entre o puro rural e o ambiente urbano central. Em função das condições locais, esta zona pode assumir comprimentos mais ou menos significativos ou, em situações limite pode simplesmente não existir, resumindo-se a uma secção de transição do ambiente rural para o urbano.

O recurso a elementos verticais assume particular relevância neste tipo de tratamentos, na medida em que permite controlar os níveis de visibilidade, podendo ser introduzidos de modo a contribuírem de forma gradual para a redução da “largura óptica” (ver Fig. 7). Alguns trabalhos de investigação comprovam que os condutores tendem a reduzir a velocidade sempre que a largura óptica (w) é inferior à altura dos elementos verticais (altura óptica – h). O conceito da largura óptica deve ser adoptado de forma progressiva ao longo da zona de transição, procurando assegurar a dominância dos elementos verticais em relação à largura disponível.

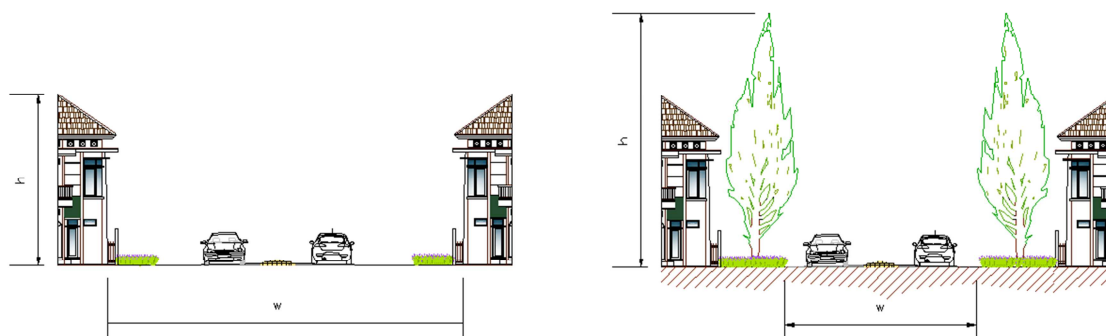


Fig. 7. Largura óptica (w): (a) $w > h$, encorajando à prática de velocidades elevadas; (b) $w < h$ efeito redutor de velocidade.

Nessa linha de acção é normalmente recomendada a adopção de elementos verticais com alturas crescentes, ou em alternativa, uma distribuição contínua desses elementos numa aproximação cada vez maior à faixa de rodagem (ver Fig. 8 e Fig. 9).



Fig. 8. Redução gradual da largura óptica recorrendo à utilização de árvores.

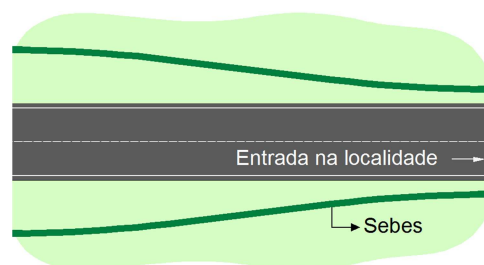


Fig. 9. Redução gradual da largura óptica recorrendo à utilização de arbustos.

Esta zona representa o local privilegiado para fazer a transição entre berma e passeio. Considera-se contudo aceitável a manutenção das bermas sempre que a presença do peão e ciclista for pouco significativa. Nessas situações, a segregação física das bermas através de lancis, ou a alteração do tratamento superficial pode revelar-se extremamente útil do ponto de vista da segurança. Esta zona representa ainda o local privilegiado para surgimento da iluminação pública, garantindo preferencialmente a continuidade desde o portão de entrada.

De igual forma, devem ser formalizadas passagens de peões, as quais devem ser preferencialmente associadas a separador central. A materialização desta solução pressupõe a implementação de uma gincana, servindo também como meio de moderação da velocidade.

Também as paragens de transportes colectivos devem merecer um tratamento especial nestas zonas. Considera-se fundamental a construção de um passeio numa extensão de comprimento mínimo entre o abrigo e a zona de atravessamento pedonal.

Tratamento da zona urbana

O tratamento da zona urbana traduz-se normalmente em duas partes fundamentais: formalização do portão de entrada e o tratamento do eixo propriamente dito, aqui traduzido em termos de definição do perfil transversal tipo.

O portão de entrada na zona urbana deve fazer transparecer a mensagem de que se está a entrar numa zona consolidada, com uma densidade de construção maior e um ambiente onde outros intervenientes são preponderantes, como os peões e ciclistas, manobras e estacionamento, usos dos solos diferenciados (comercio, serviços, residencial), entre outros.

A sua materialização poderá ser conseguida através de elementos arquitectónicos ou pelo recurso a elementos rodoviários, tais como rotundas, gincanas, estreitamentos, alterações de pavimentos, etc. (ver Figura 10 e Figura 11).



Fig. 10. Portão de entrada (Vilamoura, Portugal).

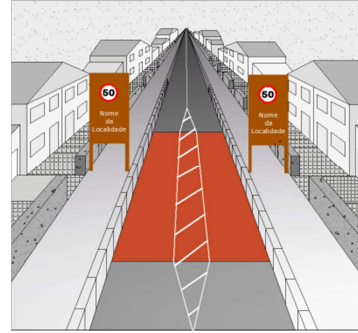


Fig. 11. Portão de entrada.

Para o tratamento dos eixos urbanos, é apresentado um conjunto limitado de soluções adaptadas a diferentes tipos de zonas urbanas dos atravessamentos de localidades, classificados com base num conjunto de três critérios pré-definidos: os níveis de procura, o espaço canal disponível e o comprimento do trecho.

O primeiro critério classifica os atravessamentos relativamente ao nível de tráfego que atravessa a localidade, considerando-se que este indicador representa uma das principais condicionantes à definição das soluções padrão correspondentes à zona urbana. Os níveis de procura de tráfego foram divididos nas seguintes três categorias: elevado ($15000 < \text{TMDa} < 25000$), moderado ($3000 < \text{TMDa} < 15000$) ou baixo (TMDa inferior a 3000) e serão apresentadas soluções padrão para cada uma destas classes.

O segundo critério procura integrar as condicionantes ligadas à disponibilização de espaço. Para as mesmas circunstâncias e exigências de base, considera-se que a existência de um espaço canal (in)condicionado influencia, determinantemente, a solução a adoptar.

Por último, o terceiro critério assenta essencialmente na forma como se deverão gerir os acessos directos aos espaços marginais à via de atravessamento quando a zona urbana é curta, tendo em conta que se pretende obter a menor perturbação possível e minimizar o risco inerente a este tipo de manobras.

A entrada nesta zona deverá ser bem notória por parte dos condutores, de modo a alertá-los para a entrada num ambiente rodoviário diferente e com exigências e preocupações de segurança maiores. Sugere-se, portanto, que a entrada na zona urbana seja marcada por um portão de entrada, o qual poderá ser constituído por uma estrutura arquitectónica ou por uma simples alteração aos elementos rodoviários.

Trechos sujeitos a níveis de tráfego elevado – $15000 < \text{TMDa} < 25000$ – sem limitações de espaço canal

Neste tipo de trechos, e atendendo aos níveis elevados de procura que importa acomodar, a solução deverá ter sempre subjacentes preocupações de fluidez e capacidade, de modo a salvaguardar os níveis de serviço mínimos a serem oferecidos pela infra-estrutura. Da mesma forma, a definição da solução deverá procurar minimizar os pontos de conflito e a sua gravidade, como resultado da interactividade entre o tráfego de atravessamento e os movimentos normais associados à vivência local. A aposta na segregação de funções revela-se indispensável, através da definição de dois canais fundamentais: canal

central, voltado para responder às necessidades de circulação, designadamente ao tráfego de atravessamento; e canais laterais, para responderem às actividades e mobilidade locais.

O perfil transversal tipo proposto para esta zona com níveis de tráfego elevado é apresentado na Fig. 12.

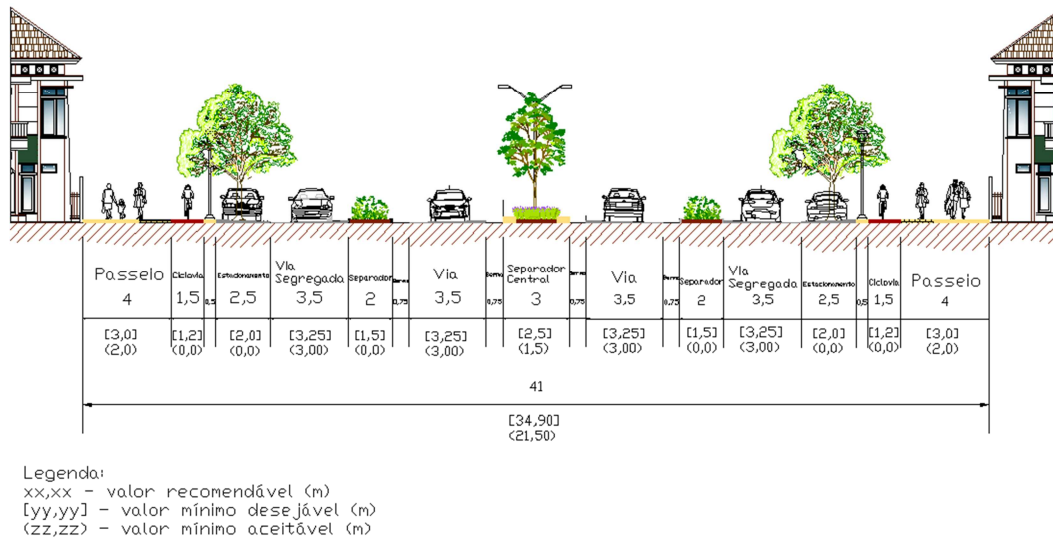


Fig. 12. Perfil transversal tipo para tráfego elevado.

Trechos sujeitos a níveis de tráfego moderado – $3000 < TMDa < 15000$ – sem limitações de espaço canal

A existência de níveis moderados de tráfego já potencia a definição de soluções que acomodem, simultaneamente e de forma equilibrada, os níveis de fluidez de tráfego e a normal vivência e actividade local, tendo em conta todas as suas exigências ao nível de segurança, espaço e comodidade.

A diminuição do volume de tráfego leva a que se possa apostar numa partilha de espaço entre o tráfego de passagem e o de acesso local, libertando assim espaço no perfil para outras funcionalidades. Apesar disso importa definir soluções de equilíbrio, limitando a localização das passagens de peões e baías de estacionamento, a locais que não afectem de forma significativa, a capacidade e fluidez do canal rodoviário.

O perfil transversal tipo proposto para zonas urbanas sujeitas a níveis de tráfego moderado é apresentado na Fig. 13.

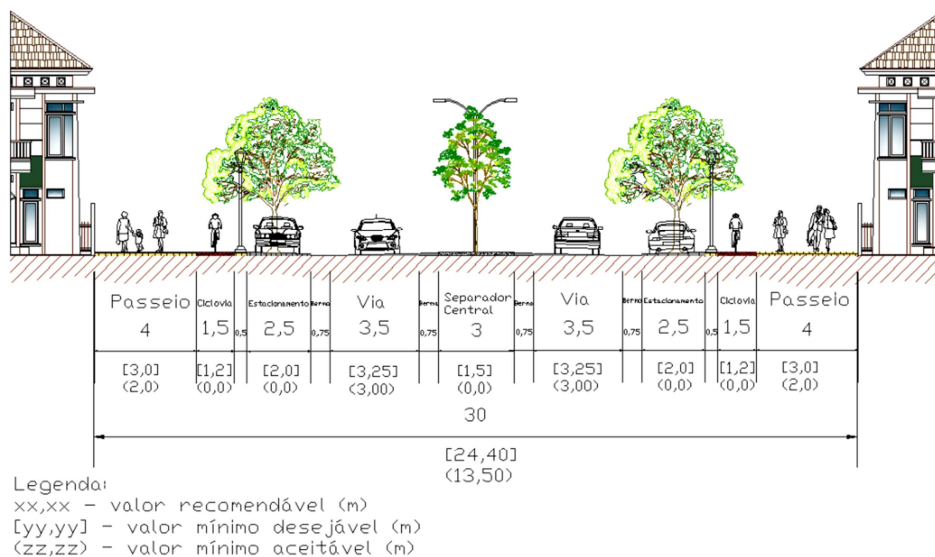


Fig. 13. Perfil transversal tipo para tráfego moderado.

Trechos sujeitos a níveis de tráfego baixo – TMDa < 3000 – sem limitações de espaço canal

Perante trechos sujeitos a níveis de tráfego baixo, o factor fluidez deixa de ser o mais relevante. As preocupações a integrar no desenvolvimento das soluções são transferidas para o tratamento do espaço urbano adjacente e na sua devida compatibilização com a via de atravessamento, numa perspectiva de promoção e defesa das actividades locais e dos utilizadores vulneráveis.

A solução proposta aposta no desenho de uma via de atravessamento, transformada em “rua”, é o seu perfil transversal tipo é apresentado na Fig. 14.



Fig. 14. Perfil transversal tipo para tráfego baixo.

Trechos sujeitos a limitações de espaço canal

As restrições de espaço ao nível do canal disponível, fachada a fachada, traduzem-se directamente numa imposição de restrições ao nível do perfil transversal tipo. Nessas circunstâncias, importa

primeiramente avaliar a hipótese de adaptação do perfil transversal, reduzindo a largura de cada elemento construtivo às dimensões mínimas desejáveis ou mínimas absolutas. Caso tais restrições não se revelem suficientes, importa avaliar que elementos constituintes podem ser eliminados, sem que tal se traduza na perda de funcionalidade e segurança do espaço, e de modo a assegurar um nível de serviço satisfatório relativamente ao volume de tráfego de atravessamento.

A Fig. 15 e a Fig. 16 apresentam, a título de exemplo, para o caso de soluções com níveis elevados/moderados e moderados/baixos de procura de tráfego, aquelas que são consideradas as dimensões mínimas absolutas aplicáveis.

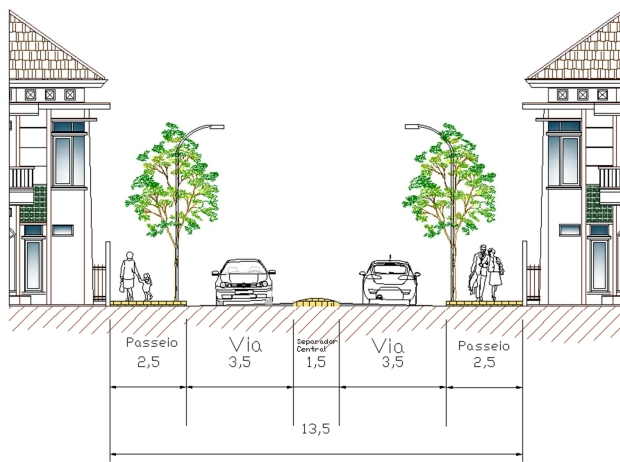


Fig. 15. Dimensões mínimas do perfil transversal tipo de uma zona urbana sujeita a um nível de tráfego elevado/moderado.

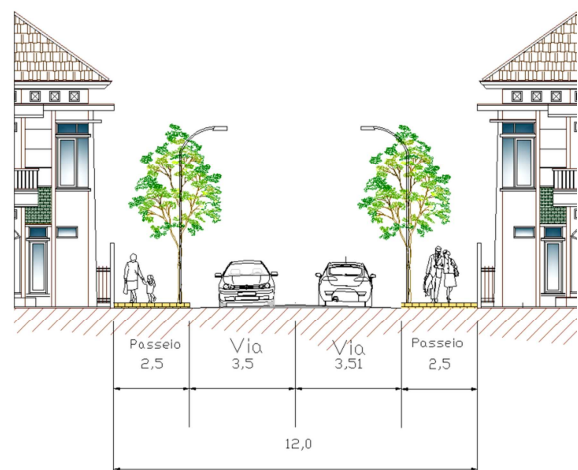


Fig. 16. Dimensões mínimas do perfil transversal tipo de uma zona urbana sujeita a um nível de tráfego moderado/baixo.

Trechos urbanos de pequena extensão

Uma zona urbana curta ou inexistente associa-se normalmente a aglomerados urbanos que são atravessados marginalmente por uma estrada, desenvolvendo-se o tecido urbano principal em espaços marginais, mais ou menos afastados do troço de estrada em estudo. Pode ainda corresponder a localidades onde não exista um centro marcadamente urbano, caracterizando-se pela apresentação de edificações de forma dispersa e relativamente afastadas da faixa de rodagem. Neste tipo de situações poder-se-á, consoante os casos, admitir que o troço efectivamente urbano possui dimensões muito reduzidas, ou simplesmente não existe. Quando existe, importa enfatizar esse troço desde logo, através da imposição de um limite de velocidade adequado (eventualmente os 50 km/h ou ainda mais restritivos), acompanhado de um conjunto de medidas restritivas à prática de velocidades elevadas por parte dos condutores e de medidas de protecção dos utilizadores vulneráveis. Duas situações podem ocorrer:

1. Em troços sem condicionantes de espaço e com extensões inferiores a 1000 m dever-se-á implementar o perfil transversal ideal, balizado longitudinalmente pela presença de duas rotundas normais;
2. Face a condicionamentos de espaço e pelo facto do troço de atravessamento ser curto, considera-se que a perturbação do aglomerado é sempre limitada e portanto aceitável, devendo remeter-se, tanto

quanto possível, a resposta às funções de acessibilidade para as vias locais internas ao aglomerado, libertando o canal para resposta às necessidades do tráfego de atravessamento.

Medidas complementares

A integração paisagística assume uma contribuição importante nos projectos de aplicação de acalmia de tráfego. A concepção deste tipo de medidas deve ter em atenção a salvaguarda das necessidades de visibilidade, ligadas quer às intersecções, acessos locais e passagens de peões, quer em relação à própria faixa de rodagem.

A *iluminação pública* é extremamente importante na marcação da zona de transição, como marca de entrada na localidade e é indispensável ao longo de toda a zona urbana desempenhando um importante papel em termos de segurança pessoal e rodoviária, revelando-se essencial à segurança nocturna dos peões e ciclistas.

Também o recurso à alteração de *pavimentos* se revela indispensável, podendo enfatizar a segregação de funções, ou realçar a delimitação de espaços afectos a cada utilizador (Herrstedt, 1993). Por razões de índole económica e prática, devem ser escolhidos materiais sólidos, considerados estética e acusticamente adequados e que salvaguardem bons níveis de desgaste ao longo do tempo. Importa ainda que a selecção dos materiais tenha em consideração as exigências em termos de coeficientes de atrito mínimos, particularmente quando associados à circulação automóvel e ciclável.

Em casos de restrições acentuadas de espaço o separador central poderá ser galgável, devendo este ser constituído por um material rugoso, tornando-o, por um lado, visualmente notório e, por outro lado, suficientemente desconfortável para ser utilizado pela normal circulação.

Também a *plantação de árvores ou de arbustos* é normalmente muito utilizada na marcação da alteração de ambientes urbanos, designadamente como elementos verticais de complemento ao portão de entrada. Na secção do portão é ainda habitual recorrer à utilização conjunta de árvores e de arbustos de pequeno porte, reforçando o efeito de “fecho” do portão.

Todas as árvores e arbustos plantados na faixa de 10 m adjacentes à faixa de rodagem devem ser frágeis. As árvores devem ser de pequeno porte, com troncos que não devem exceder os 10 cm, medidos a 40 cm a partir do solo. Quer as árvores, quer os arbustos não devem interferir com as condições de boa visibilidade por parte dos condutores.

O plantio de vegetação é muito importante no que diz respeito à requalificação do ambiente urbano, contribuindo para a criação de locais apazíveis, sombreamentos e purificação do ar.

Também o *mobiliário urbano* se revela indispensável à marcação do espaço urbano, sendo um elemento fundamental à salvaguarda da sua funcionalidade. A presença de bancos de jardim, caixotes do lixo, ecopontos, abrigos nas paragens de transportes colectivos, candeeiros de iluminação exterior, bebedouros ou cinzeiros, são alguns exemplos de como dar funcionalidade ao espaço urbano, contribuindo ainda para a requalificação do espaço envolvente. O mobiliário urbano aliado e enquadrado com a plantação de vegetação, assim como com passeios largos, permite a criação de espaços agradáveis e seguros para o convívio e lazer da população residente nestes locais.

O mobiliário urbano, quando integrado com medidas de acalmia de tráfego procura reforçar o carácter obstrutivo de algumas medidas contribuindo para uma requalificação urbana e para marcação de alteração do ambiente rodoviário, muitas vezes com o uso conjunto de pavimentos de cores diferenciadas, sinalização e/ou arborização.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo procurou apresentar um contributo para melhorar as condições de segurança nos trechos de atravessamento de localidades e seus espaços adjacentes. Para esse feito foram abordadas e apresentadas medidas susceptíveis de serem aplicadas às zonas de aproximação e de transição de um atravessamento de localidade, assim como às zonas urbanas.

Para as zonas de aproximação e transição, tendo em conta que estas zonas correspondem a locais onde as velocidades de base serão da ordem dos 90 km/h e de 70 km/h, respectivamente, as medidas de acalmia de tráfego não podem ser demasiado restritivas, assumindo como principal função alertar o condutor para a aproximação de locais de potencial risco acrescido.

No que diz respeito à zona urbana, foi definido um conjunto limitado de soluções padrão, facilmente replicáveis a situações que evidenciem características de base e problemas semelhantes, baseados em três critérios fundamentais, nomeadamente o volume de procura de tráfego, as condicionantes do espaço canal e a extensão do trecho correspondente a esta zona.

As medidas apresentadas não pretendem ser restritivas, mas sim exemplos de tratamentos susceptíveis de serem aplicados aos trechos de atravessamento de localidades. Cada atravessamento é um caso único e com características distintas que o diferenciam de outros atravessamentos que, embora podendo ser semelhantes, não serão de todo iguais. Por este motivo é necessária uma avaliação específica de cada atravessamento a tratar, elaborada por uma equipa técnica competente para o efeito, normalmente multidisciplinar.

É ainda de realçar a necessidade do envolvimento da população na concretização deste tipo de projectos. A população residente é a que melhor conhece os problemas locais, pelo que constitui um interveniente activo e fundamental à credibilização e aceitação das soluções finais.

Finalmente, importa sublinhar a necessidade de monitorizar o funcionamento das soluções implementadas, potenciando o seu constante reajuste e adaptação às exigências locais, contribuindo ainda para um melhor conhecimento sobre o efeito real das medidas, no desempenho geral da infraestrutura viária.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi desenvolvido no âmbito do projecto *SAFESPEED - Speed management strategies: an instrument for the implementation of safe and efficient road management solutions*, projecto de investigação financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia do Ministério da Ciência e Tecnologia e Ensino Superior.

REFERÊNCIAS

- ANSR – Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária (2010). *Ano de 2010, Sinistralidade Rodoviária*. Observatório de Segurança Rodoviária.
- Bastos Silva, A. M., Seco, A. J., Marques, J. S., Marques, P., & Santos, G. G. (2004). Potencialidades das técnicas de acalmia de tráfego na regulação do atravessamento de localidades. Coimbra. Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Bastos Silva, A. M., Seco, A. J. (2008). Potencialidades das técnicas de acalmia de tráfego na regulação do atravessamento de localidades. Coimbra. Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Cupolillo, M. T. (2006). Estudo das medidas moderadoras do tráfego para controle da velocidade e dos conflitos em travessias urbanas. Rio de Janeiro, Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro. COPPE.
- Cupolillo, M. T., Portugal, L. d., & Braga, M. G. (2007). Proposta de medidas moderadoras de tráfego para travessias urbanas de rodovias rurais. Rio de Janeiro, Brasil. Programa de Engenharia de Transportes – COPPE/UFRJ. Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Department for Transport. (2000). “Traffic Calming in villages on major roads.” Traffic Advisory Leaflet 1/00. London, UK.
- DHV Environment and Transportation. (2005). Sustainable safe road design. Holanda.
- ETSC - European Transport Safety Council. (2008). ShLOW! Show me How Slow - Reducing Excessive and Inappropriate Speed Now: a Toolkit. Gabriel Simcic.
- Hallmark, S. L., Peterson, E., Fitzsimmons, E., Hawkins, N., Resler, J., & Welch, T. (2007). Evaluation of gateway and low-cost traffic calming treatments for major routes in small rural communities. South Loop Drive, Suite 4700, Iowa, EUA. Iowa State University.
- Herrstedt, L. (1993). An Improved Traffic Environment – A Catalogue of ideas. Denmark. Danish Road Directorate - Ministry of Transport.
- MAI (Ministério da Administração Interna). (Março, 2003). PNPR, 2003 – Plano Nacional de Prevenção Rodoviária. Ministério da Administração Interna. Portugal.
- National Roads Authority. (2005). Guidelines on Traffic Calming for Towns and Villages on National Roads. St Martin’s House, Waterloo Road, Dublin 4.
- OECD/ECMT. (2006). Speed management. Paris, France. Jint OECD/ECMT Transport Research Centre.
- TRB. (1998). Management Speed – Review of current practice of setting and enforcing speed limits. Special Report, 254 .

PROCEDIMENTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FATORES A SEREM CONSIDERADOS EM ESTUDOS DE ENGENHARIA VOLTADOS À DEFINIÇÃO DE VELOCIDADE LIMITE PARA RODOVIAS

Maria Alice Prudêncio Jacques
Érica Cristina Silva Marques

Programa de Pós-Graduação em Transportes
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Universidade de Brasília

RESUMO

A definição da velocidade limite para as rodovias constitui-se em importante mecanismo para a promoção da segurança viária. Apesar da relevância dessa definição, os estudos de engenharia realizados com esse propósito ressentem-se de elementos objetivos que permitam assegurar que sejam definidas velocidades limites similares para vias com condições físicas e operacionais semelhantes, resultando em situações muitas vezes incompreensíveis e inaceitáveis sob o ponto de vista dos usuários. O presente trabalho tem por objetivo contribuir com o aprimoramento dos estudos de engenharia voltados à definição de velocidades limites para rodovias. Ele apresenta um procedimento que permite a identificação dos principais fatores a serem considerados pelos técnicos na definição da velocidade limite para novas rodovias e, também, para rodovias já em fase de operação. Este procedimento tem por base a coleta de dados junto a especialistas de órgãos rodoviários, e foi aplicado com sucesso no Brasil. Resultados dessa aplicação são apresentados ao final do presente trabalho como forma de exemplificar o potencial do procedimento proposto em atingir seu objetivo.

INTRODUÇÃO

Uma das práticas mais empregadas para o gerenciamento da velocidade em rodovias e vias urbanas é a definição da velocidade máxima que os condutores podem imprimir a seus veículos (Tsu *et al.*, 2004). Esta velocidade é, em geral, referida como velocidade limite estabelecida para a via e sua definição, cujo propósito é promover a circulação de veículos e pedestres de forma segura, se justifica em função de dificuldades que os condutores dos veículos enfrentam na percepção dos riscos a que se expõem e submetem os demais usuários da via quando trafegam em velocidade incompatível com as condições da via e do ambiente viário. A definição da velocidade limite parte do pressuposto de que menores velocidades implicam na redução do número de acidentes ou, pelo menos, da severidade dessas ocorrências.

De acordo com TRB (1998), as principais razões para controlar a escolha da velocidade a ser feita pelo condutor são:

- (i) Externalidades: a escolha da velocidade realizada por um condutor afeta não só a sua segurança mais também a segurança dos demais usuários da via, que podem não aceitar o mesmo nível de risco;
- (ii) Informação inadequada: o conhecimento do condutor com relação às características da via, do tráfego, e até mesmo da capacidade de resposta do seu veículo, pode não ser suficiente para a correta tomada de decisão quanto à velocidade segura a adotar;

(iii) Erro de julgamento: o condutor pode avaliar de modo incorreto os efeitos da velocidade do seu veículo sobre a probabilidade de ocorrência de um acidente e da severidade que este, caso ocorra, terá. Além disso, o motorista pode superestimar sua habilidade em controlar o veículo em alta velocidade e a habilidade dos demais condutores em reagir aos riscos a que sua condução pode submetê-los.

Diversos métodos têm sido empregados pelos órgãos responsáveis pela gestão do tráfego para a definição da velocidade limite, tais como: adoção de limites legais de velocidade; realização de estudos de engenharia; utilização de sistemas especialistas, desenvolvidos a partir do conhecimento acumulado de especialistas na área (AUSTROADS, 2005); adoção de limites de velocidade variável, em que a velocidade limite pode variar em função das condições da superfície da via, condições atmosféricas, situações específicas de tráfego, dentre outras (Robson, 2000); e velocidade ótima, que prevê a definição da velocidade limite com base na minimização do custo total do transporte para a sociedade (Cameron, 2002). Além destes, destaca-se o programa *Vision Zero* que preconiza que os usuários da via não devem ser expostos a situações de violência que não possam ser suportadas pelo corpo humano, como as decorrentes de acidentes (Tingvall e Haworth, 1999).

Estes métodos levam em conta diferentes critérios, buscando definir velocidades limites que sejam racionais. De acordo com Srinivasan et al. (2006), velocidade limite racional é aquela que proporciona segurança aos usuários da via, que a maioria das pessoas considera apropriada, e que é exequível. Isto é, o limite de velocidade deve corresponder às características da via e ser aceito pelo usuário.

A definição da velocidade limite para rodovias a partir de estudos de engenharia tem sido prática corrente em diferentes países, e vários textos técnicos referem diferentes fatores a serem considerados na realização destes estudos. No entanto, na maioria deles, não é feita referência sobre a importância relativa desses fatores para a definição da velocidade limite, nem como a avaliação de cada fator está associada a valores a serem estabelecidos para essa velocidade. Esta ausência de diretrizes mais concretas tem levado a situações em que velocidades limites distintas são estabelecidas para vias com características semelhantes, mesmo no caso destas estarem sob a circunscrição de um mesmo órgão gestor.

Neste contexto, o presente trabalho visa contribuir com a superação da primeira dificuldade enfrentada na realização dos estudos de engenharia para a definição da velocidade limite. Apresenta um procedimento que visa permitir a identificação dos principais fatores a serem considerados para a definição da velocidade limite, e qual o peso que cada fator deve ter nessa definição. Pode ser aplicado tanto em nível de um único órgão gestor, onde se deseje padronizar a prática de todos os técnicos que nele atuam, quanto em nível mais abrangente para efeito da definição de normas gerais a serem seguidas por diferentes órgãos. Embora ele tenha sido concebido visando à definição da velocidade limite para rodovias, ele pode ser aplicado, com pequenas adaptações, para o estudo dos fatores a serem considerados na definição da velocidade limite para vias urbanas

FATORES USUALMENTE CONSIDERADOS NOS ESTUDOS DE ENGENHARIA

Os estudos de engenharia realizados para a definição de velocidades limites para rodovias consistem em estudos técnicos que levam em conta as características da via, do tráfego e do ambiente viário. Seus resultados, além disso, devem respeitar os limites máximos legais de velocidades estabelecidos para o tipo de via considerado.

Em geral, estes estudos são baseados em orientações gerais dadas por normas e ou dispositivos legais existentes em cada país, que estabelecem aspectos a serem observados pelos técnicos na definição da velocidade limite para cada via. Neste trabalho, estes aspectos são referidos como fatores, e servirão de base para o desenvolvimento do procedimento proposto.

Assim, inicialmente, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica de trabalhos relacionados a estudos de engenharia ou a fornecer subsídios para a realização desses estudos. Tendo em vista que os sistemas especialistas também incluem explicitamente fatores a serem considerados para a definição da velocidade limite, alguns desses sistemas foram também analisados.

Como resultado desta revisão, foi obtida a síntese mostrada na Tabela 1, na qual os principais fatores considerados em diferentes trabalhos estão reunidos. A dificuldade encontrada na elaboração desta síntese advém do conflito entre os termos utilizados nos diferentes estudos. Os termos foram padronizados e traduzidos para o português do Brasil.

Tab. 1. Fatores considerados para a definição de velocidade limite nos estudos revisados.

Fatores	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Fatores (cont.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Acostamento (presença e condições)			x			x		x	x		Legislação local		x									
Afastamento das edificações				x	x						Localização urbana ou rural		x	x						x		
Atitude/solicitação do público para alteração de velocidade limite		x	x								Meio-fio e sarjeta (presença) (1)		x	x								
Ciclistas (presença de facilidades)				x							Parada de ônibus					x	x					x
Ciclistas (presença; volume; atividades)				x	x	x	x				Pavimento (largura; tipo; condições)			x	x	x	x		x			
Classe da via (classe funcional) (1)		x	x	x		x		x	x		Pedestres (presença de facilidades)				x		x	x	x			x
Composição do tráfego (presença de veículos pesados)						x		x			Pedestres (presença; volume; atividades)	x	x	x	x		x	x	x	x		x
Comprimento do trecho da via				x			x				Risco nas margens da via (elementos de risco; condições inesperadas)				x			x	x	x		x
Condições para deslocamento lateral dos veículos (retornos, conversões, troca de faixas)								x			Seção transversal da via (elementos) (1)		x									
Critério de projeto do departamento de transporte (1)		x									Tipo de controle de tráfego (presença; quantidade)				x		x	x				
Custo de construção (1)		x									Tipo e densidade do uso do solo (área e/ou lateral da via) ; Presença geradores de tráfego (escolas, hospitais e outros)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
Design do veículo		x									Topografia do local (1)		x							x		
Distâncias de visibilidade permitida pelo layout da via				x					x		Velocidade de projeto	x	x	x		x						
Divisor central (presença ; tipo)				x		x	x				Velocidade de ritmo	x	x									x
Estacionamento (na via e fora da via; influência no fluxo; avaliação da existência e condições)		x	x	x			x	x	x	x	Velocidade limite (existente/prevista) (1)		x		x							
Faixas de trânsito (número)					x		x	x			Velocidade limite em trechos adjacentes	x			x		x					
Faixas de trânsito (largura)				x	x		x				Velocidade máxima legal (2)			x		x						
Geometria da via (horizontal; vertical; alinhamento inadequado)	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Velocidade média	x	x									
Histórico de acidentes	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	Velocidade operacional (V50)									x		
Iluminação da via				x							Velocidade operacional (V85) (2)	x	x	x		x	x	x	x	x		x
Impactos ambientais		x									Velocidade segura para curvas		x								x	
Interseções e acessos (presença ; quantidade; com desnível; sem desnível)						x	x	x		x	Volume de tráfego		x	x	x	x	x	x	x			

(1) Para Fitzpatrick et al. (1997) estes fatores são utilizados para a determinação de velocidade em via novas
(2) Para Fitzpatrick et al. (1997) estes fatores são utilizados para a determinação de velocidade em vias novas e vias já existentes

1 - Parker (1985) apud Skszek (2004) ; 2 - Fitzpatrick et al. (1997); 3 - ITE (2001) apud Srinivasna et al. (2006); 4 - Nova Zelândia (LTSA, 2003); 5 - Skszek (2004); 6 - XLIMITS (AUSTRROADS, 2005); 7 - USLIMITS (Srinivasan et al., 2006); 8 - CONTRAN (2007); 9 - MUTCD (FHWA, 2009); 10 - Correia e Silva (2010)

Os estudos revisados apresentam como fatores mais frequentes, presentes em 90% dos casos: a geometria da via (horizontal; vertical; alinhamento inadequado); o histórico de acidentes; e o tipo e densidade do uso do solo. Outros fatores que também se destacam são: presença, volume e atividades de pedestres; e a velocidade operacional V85. Estes fatores estão presentes em 80% dos estudos revisados. Dentre os fatores presentes em somente 40% dos estudos analisados estão: a velocidade de projeto; a presença de facilidades para pedestres; o pavimento da via (largura, tipo e condições); as interseções e acessos (presença, quantidade e tipo); a presença, volume e atividades de ciclistas; e o acostamento (presença e condições).

PROCEDIMENTO PROPOSTO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FATORES RELEVANTES A CONSIDERAR NOS ESTUDOS DE ENGENHARIA

A estrutura geral do procedimento proposto para obtenção da hierarquia e pesos dos fatores a serem considerados na definição de velocidade limite para as rodovias compreende as cinco etapas indicadas no fluxograma da Figura 1.

Nas seções a seguir estão detalhadas as etapas mostradas na Figura 1.

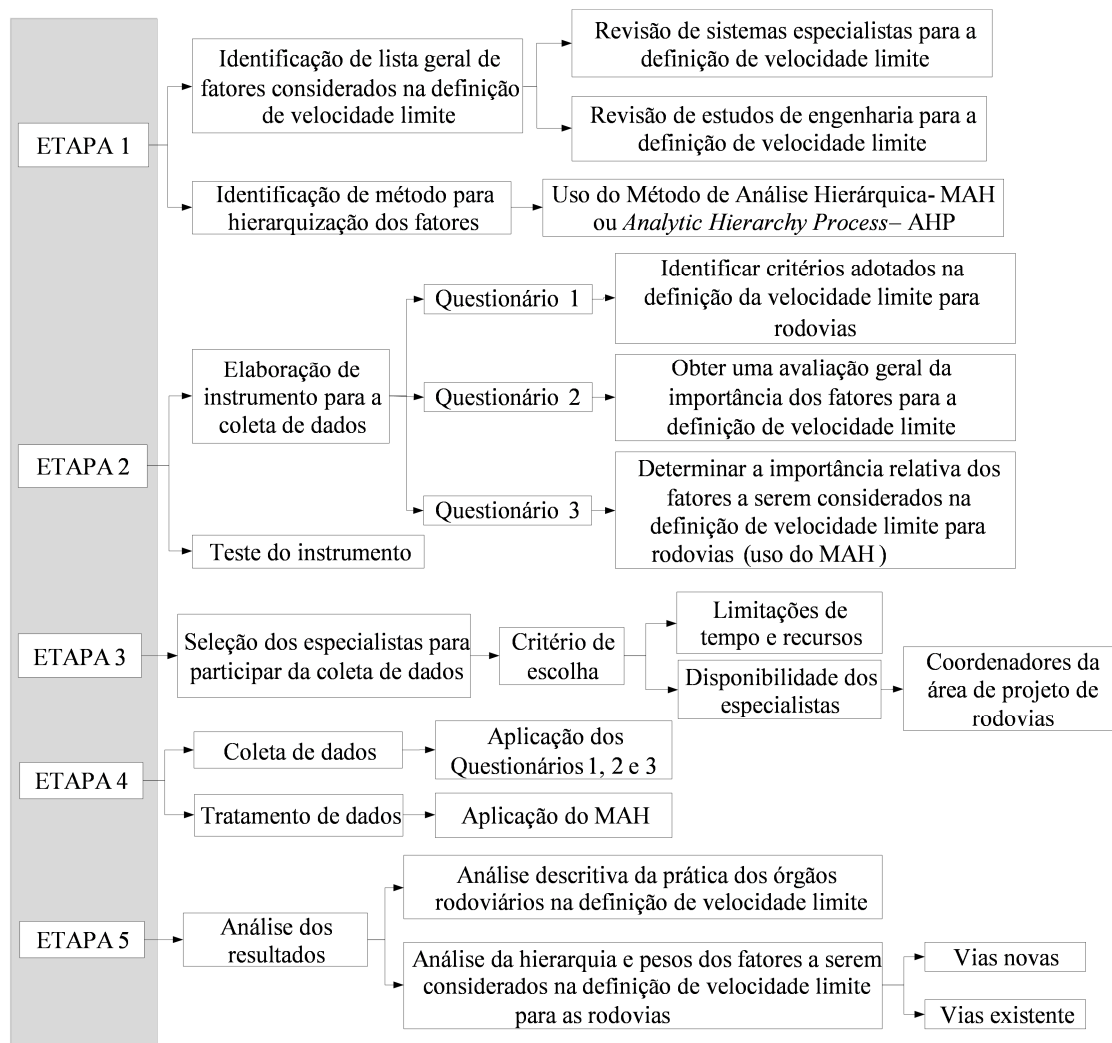


Fig. 1. Estrutura geral do procedimento proposto.

ETAPA 1: identificação de lista de fatores considerados na definição de velocidade limite e de método para hierarquização dos fatores

Esta etapa do procedimento tem o intuito de identificar uma lista geral de fatores a serem considerados em processo de consulta a especialistas. Visa, também, identificar o método a ser utilizado na hierarquização dos fatores.

Os fatores extraídos da revisão bibliográfica (ver Tabela 1) passaram por uma triagem, a fim de serem eliminados fatores repetidos, fatores indicados por poucos autores e fatores incomuns. Posteriormente esses fatores foram agrupados em 5(cinco) categorias, conforme apresentado na Tabela 2.

Tab. 2. Grupo de Fatores considerados no processo de consulta a especialistas.

GRUPO DE FATORES	
1 CLASSIFICAÇÃO DA VIA	3.3 Outros elementos
1.1 Classificação geral	3.3.1 presença de facilidades para pedestres
1.2 Classificação funcional	3.3.2 presença de facilidades para ciclistas
1.3 Classificação técnica	3.3.3 estacionamento
2 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA LATERAL DA VIA (área lindeira)	3.3.4 iluminação pública
2.1 Elementos nas margens da via	3.3.5 dispositivos auxiliares
2.2 Uso e ocupação do solo nas áreas lindeiras	3.4 Pavimento
3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA VIA	3.5 Pontes e viadutos
3.1 Geometria	4 VELOCIDADES DE REFERÊNCIA
3.1.1 características do alinhamento horizontal	4.1 Velocidade de projeto
3.1.2 características do alinhamento vertical	4.2 Limite legal máximo de velocidade
3.1.3 características da seção transversal	4.3 Velocidade limite estabelecida para a via
3.2 Interseções, retornos e acessos	5 CARACTERÍSTICAS DO TRÁFEGO
3.2.1 presença de interseções	5.1 Presença e volume de pedestres e ciclistas
3.2.2 controle do tráfego nas interseções	5.2 Volume e composição do tráfego veicular
3.2.3 presença de retornos	5.3 Número de acidentes
3.2.4 presença de acessos	5.4 Velocidades praticadas

Para efeito deste procedimento recomenda-se a aplicação do Método de Análise Hierárquica – MAH (*Analytic Hierarchy Process* – AHP) para a definição da importância relativa e hierarquização dos fatores.

ETAPA 2: Elaboração e teste do instrumento de coleta

A Etapa 2 é caracterizada pela elaboração e aplicação de teste do instrumento de coleta de dados. O teste do instrumento proposto neste artigo foi realizado com especialistas da área de projeto e operação de rodovias brasileira. Em função desse teste alguns ajustes foram feitos visando à aplicação dos instrumentos na etapa efetiva de coleta de dados.

O instrumento de coleta é composto por três Questionários:

- Questionário 1: tem a função de conhecer a prática do órgão na definição da velocidade limite; ele contém as questões apresentadas na Tabela 3;
- Questionário 2: consiste da verificação geral da concordância dos entrevistados com os elementos da lista geral de fatores e, também, permite que estes incluam outros fatores;
- Questionário 3: busca identificar o peso de cada fator citado no Questionário 2 e, portanto, a determinação da importância relativa dos fatores para rodovias em fase de projeto e em fase de operação. Este questionário serve de base para a aplicação do MAH. Na Figura 2 é apresentado um exemplo de utilização desse questionário.

A versão completa proposta para cada um dos questionários está disponível em Marques (2012). Cabe destacar que o instrumento proposto visa permitir a identificação dos principais fatores a serem empregados para a definição da velocidade limite de rodovias em dois casos distintos: rodovias novas e rodovias em operação (referidas nos questionários como “rodovias existentes”).

Tab. 3. Questões para a coleta de informações referentes aos procedimentos adotados na definição de velocidade limite.

1) Quais as normas utilizadas pelo órgão para a definição da velocidade limite? (Cite as normas e o ano em que foram publicadas. No caso de serem adotadas normas específicas do órgão, anexar ao questionário uma cópia das mesmas)
2) Levando em conta as normas referidas na Questão 1 e a experiência prática dos técnicos que atuam no órgão, quais os principais critérios adotados para a definição da velocidade limite para novas rodovias?
3) Em que situações o órgão faz alteração da velocidade limite de rodovias existentes?
4) Quais os critérios usados para a definição de uma nova velocidade limite para uma via ou trecho viário já em operação (aumento ou redução da velocidade existente)?

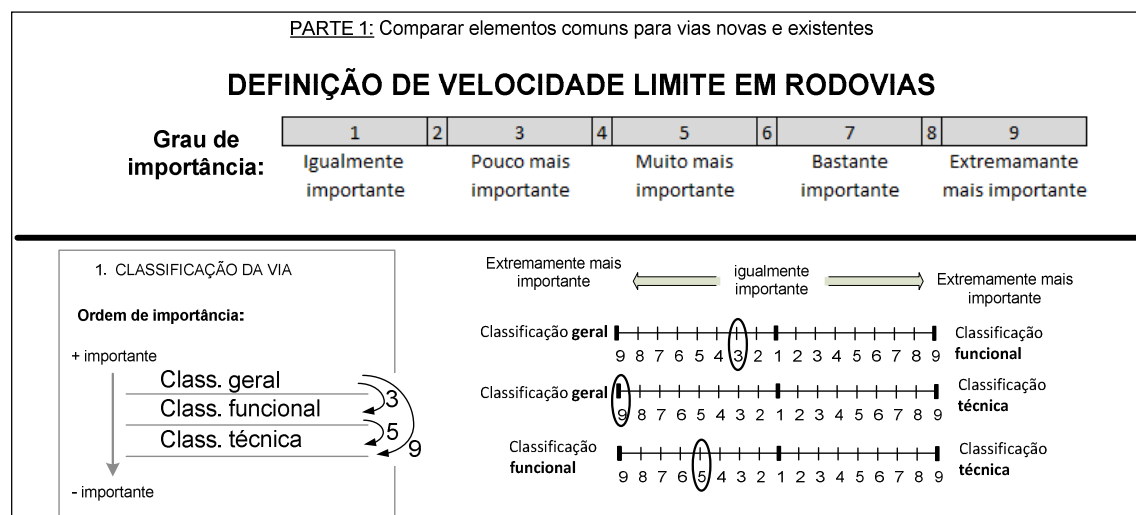


Fig. 2. Exemplo de preenchimento do Questionário 3.

ETAPA 3: Seleção dos especialistas

A Etapa 3 do procedimento tem por objetivo selecionar os especialistas para participar da coleta de dados. A escolha desses especialistas deve levar em conta o propósito da aplicação do procedimento e considerar, também, as limitações de tempo e recursos para a realização dessa aplicação. Em qualquer caso, é importante que cada participante selecionado tenha reconhecida experiência na questão da definição de velocidades limite para rodovias.

ETAPA 4: Coleta e tratamento de dados

A Etapa 4 do procedimento compreende a coleta e o tratamento dos dados obtidos com a aplicação dos instrumentos descritos na Etapa 2.

Na fase de coleta, para facilitar a compreensão dos técnicos e o correto preenchimento dos questionários, é importante a atuação do responsável pela atividade junto ao especialista. Ele deve orientar o entrevistado, especialmente no preenchimento do Questionário 3, para garantir que as respostas não gerem inconsistência, sobretudo quando o técnico não tem conhecimento prévio do MAH. A inconsistência é verificada no seguinte caso: considerando os elementos A_1 , A_2 e A_3 . Se o elemento A_1 é 3 vezes mais dominante do que o elemento A_2 , ou seja $A_1=3 \times A_2$, e o elemento A_1 é 6 vezes mais dominante do que o elemento A_3 , ou seja $A_1=6 \times A_3$, então se $A_2 \neq 2 \times A_3$ o julgamento será inconsistente. O julgamento não necessita ser totalmente consistente, já que o método permite uma margem de inconsistência nos julgamentos igual a 0,10.

O tratamento consiste na validação dos dados coletados, especialmente na verificação da presença de inconsistências nas respostas apresentadas no Questionário 3, que podem comprometer a aplicação do MAH. Nesta etapa os dados são transferidos para o programa computacional com o qual será feita a análise hierárquica dos fatores.

O MAH utiliza os seguintes passos para se chegar ao resultado:

Passo 1 - Definição do problema e determinação do objetivo;

Passo 2 - Estruturação da hierarquia;

Passo 3 - Comparação paritária dos fatores;

Passo 4 - Obtenção das prioridades;

Passo 5 - Sintetização de prioridades;

Passo 6 – Verificação da consistência dos julgamentos;

Passo 7 - Combinação dos julgamentos individuais de vários participantes.

ETAPA 5: Análise dos resultados

Esta etapa consiste na análise dos resultados da aplicação do procedimento adotado. Os resultados da aplicação dos Questionários 1 e 2 são apresentados como análise descritiva, onde se apresenta a prática utilizada nos órgãos entrevistados para a definição de velocidade limite, como também a opinião dos especialistas sobre a importância dos fatores citados na Tabela 2.

Como resultados da aplicação do Questionário 3 são obtidos os pesos de cada fator dentro de seu grupo e dos grupos entre si. Além de se obter o resultado referente à participação de cada especialista individualmente, também é possível obter a opinião de um grupo de especialistas, definido de acordo com a conveniência do estudo que está sendo realizado.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PROPOSTO

Na aplicação do procedimento junto a órgãos rodoviários brasileiros, o MAH foi realizado com a utilização do software *Expert Choice*, em função da disponibilidade de sua licença no Programa de Pós-graduação em Transportes da UnB e porque suas características permitem que os objetivos pretendidos sejam alcançados.

Foram entrevistados especialistas de órgãos rodoviários estaduais, do órgão rodoviário federal brasileiro e da agência reguladora que, dentre outras atividades, regula as concessões das rodovias federais. Foram, portanto, incluídos na referida aplicação os seguintes órgãos: Agência Nacional de Transporte Terrestre (ANTT), Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), Departamento de Estradas de Rodagem do Distrito Federal (DER-DF), Agência Goiana de Transportes e Obras (AGETOP), Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais (DER-MG), Desenvolvimento Rodoviário S. A. (DERSA), Departamento de Estradas de Rodagem de São Paulo (DER – SP), e Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina (DEINFRA). Em todos os órgãos listados entrou-se em contato com os técnicos ligados à área de projeto e operação de rodovias, buscando, especialmente, os coordenadores da área com notória experiência no assunto tratado.

A partir dos resultados obtidos para cada órgão participante do estudo, foram obtidos resultados agregados para os órgãos estaduais, para os dois órgãos federais e para o total dos órgãos considerados (resultados globais). Os resultados obtidos mostraram que existem acentuadas diferenças entre os

órgãos e entre grupos de órgãos. A Figura 3 mostra os resultados globais obtidos para a hierarquização dos fatores a serem considerados na definição da velocidade limite em vias existentes, enquanto que a Figura 4 mostra como os pesos desses fatores variaram entre os dois grupos de órgãos (estaduais e federais).

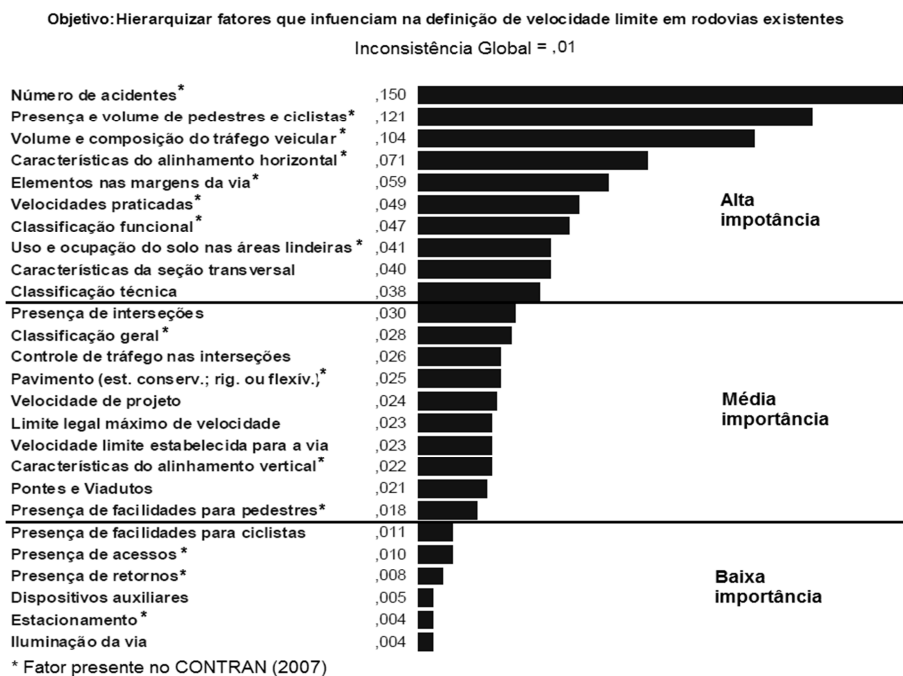


Fig. 3. Resultados globais obtidos para vias existentes.

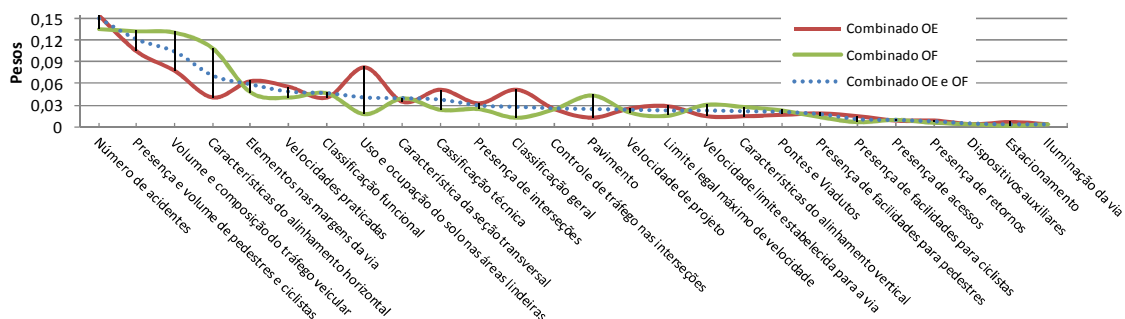


Fig. 4. Análise da variabilidade entre os resultados obtidos para vias existentes.

As diferenças observadas chamam a atenção para o fato de que a seleção dos técnicos a serem entrevistados para a determinação dos principais fatores a serem considerados na definição da velocidade limite de rodovias, sejam elas novas ou existentes, deve ser feita com base no propósito do estudo. Ou seja, tanto a definição do órgão de origem de cada técnico quanto o número de órgãos a serem incluídos no estudo devem levar em conta a abrangência da utilização prevista para os seus resultados.

CONCLUSÕES

A velocidade limite das rodovias está relacionada tanto à segurança quanto à fluidez do tráfego. Cabe aos órgãos rodoviários determinar as velocidades limites que contemplem a velocidade desejada pelos motoristas para a sua mobilidade, devidamente ajustada por fatores que reflitam as características da

via e seu entorno e do tráfego, com a finalidade de prover maior segurança aos usuários. Esta determinação é feita, na maioria dos casos, com base em estudos de engenharia realizados pelos técnicos que atuam nesses órgãos.

No sentido de contribuir com o aprimoramento dos estudos realizados pelos técnicos, esse trabalho apresenta um procedimento que permite a definição dos principais fatores a serem considerados na definição da velocidade limite de rodovias novas e existentes, juntamente com a importância relativa desses fatores. Este procedimento pode ser aplicado tanto em nível de um órgão rodoviário específico quanto levando em conta um grupo de órgãos. No primeiro caso essa aplicação visa tornar mais padronizada a tarefa de definir velocidades limites entre os técnicos de um órgão, evitando que vias com características semelhantes, sob a circunscrição do órgão, ostentem velocidades limites muito diferentes. No segundo caso, o procedimento pode ser empregado para efeito da definição de normas gerais referentes à definição da velocidade limite, a serem observadas por um conjunto de órgãos rodoviários.

Na aplicação do procedimento a órgãos rodoviários brasileiros, foi verificado que ele cumpre devidamente os seus objetivos. Tornou possível a determinação dos principais fatores (e seus respectivos pesos), na visão dos especialistas dos órgãos pesquisados, a serem empregados na definição da velocidade limite para rodovias nas duas condições previstas (vias novas e existentes). Mostrou, também, que a visão dos especialistas nessa questão difere bastante e que, por isso, a seleção dos técnicos que serão incluídos em cada estudo deve levar em conta o propósito do trabalho. Um aspecto importante, e que impõe cuidados na aplicação do procedimento, diz respeito à dificuldade no preenchimento do questionário que permite a aplicação do MAH. Essa aplicação requer assistência direta do responsável pelo estudo, além de exigir um grande tempo de envolvimento do especialista. Em algumas das aplicações realizadas, o preenchimento desse questionário chegou a levar três horas. Ou seja, a aplicação do procedimento requer um planejamento cuidadoso do trabalho de campo, sobretudo no que diz respeito a assegurar a disponibilidade de cada especialista durante o tempo necessário para a coleta dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTROADS (2005) Balance between Harm Reduction and Mobility in Setting Speed Limits: A Feasibility Study. Austroads Publication No. AP-R272/05. Sydney, Austrália: Austroads, 2005.
- Cameron, M. (2002). Estimation of the optimum speed on urban residential streets. Monash University Accident Research Center. Victoria, Australia.
- CONTRAN – Conselho Nacional de Trânsito (2007). Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito, Volume I – Sinalização Vertical de Regulamentação. 2ª Edição. Brasília: CONTRAN, 2007.
- Correia, G. H. A., Silva, A. B. (2010). Setting speed limits in rural two-lane highways using expert opinion crossed with measurable Road-side characteristics. 89º Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C.
- FHWA – Federal Highway Administration (2009). MUTCD – Manual on Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways. 2009 Edition. Washington D.C.: FHWA, 2009.
- Fitzpatrick, K., Krammes, R. and Fambro, D. (1997) Design speed, operating speed and posted speed relationships. ITE Journal, Vol. 67, No. 2, pp. 52-59.

- LTSA – Land Transport Safety Authority of New Zealand (2003). Land Transport Rule: Setting of Speed Limits 2003. In: < <http://www.nzta.govt.nz/resources/rules/docs/setting-speed-limits-2003.pdf>>. Acessado em: 07/08/2011.
- Marques, E. C. S. (2012). Fatores a Serem Considerados para a Definição de Velocidade Limite em Rodovias Brasileiras. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação: T. DM – 006 A/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.
- Robson, M. (2000). Examples of Variable Speed Limit Applications. Speed Management Workshop. In: TRB 79th Annual Meeting, Washington D.C., January 9, 2000.
- Skszek, S.L. (2004). Actual Speeds on the Roads Compared to the Posted Limits. Final Report 551. Sponsered by Arizona Department of Transportation in cooperation with FHWA, 2004.
- Srinivasan, R., Parker, M., Harkey, D., Tharpe, D. And Sumner, R. (2006). Expert System for Recommending Speed Limits in Speed Zones. Project NCHRP Project No. 3-67. Transportation Research Board, Washington, D.C. (November 2006).
- Tingvall, C., Haworth, N. (1999). Vision Zero – An ethical approach to safety and mobility. In: ITE International Conference Road Safety & Traffic Enforcement: Beyond 2000, Melbourne, 6-7 September 1999.
- TRB – Transportation Research Board (1998). Managing Speed: Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits. Special Report 254. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1998.
- TSU, B. S. A.; SUZUKI, C. Y. ; KABBACH JR., F. I. (2004). Proposta de metodologia para estabelecimento de limites legais de velocidade em rodovias de pista simples. Revista Engenharia, São Paulo, p. 169 - 174, 01 nov.

EXCESSO DE VELOCIDADE: PERFIL PSICOLÓGICO DOS INFRADORES

Inês Margarida Dimas
Elisabete Freitas
Paulo Pereira

Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

O presente estudo pretendeu contribuir para a literatura na área, identificando e analisando o papel de alguns traços de personalidade e características psicológicas no comportamento de excesso de velocidade e no envolvimento em acidentes rodoviários. A amostra, constituída por um grupo de 64 condutores por excesso de velocidade e por um grupo de 42 formadores (utilizado apenas como grupo de comparação) foi recolhida na Prevenção Rodoviária Portuguesa (PRP). Comparativamente com outros, este estudo utiliza uma amostra específica de infratores por excesso de velocidade e analisa em pormenor as dimensões dos instrumentos administrados. Estes instrumentos incluíram um questionário com dados sociodemográficos e dados sobre o comportamento de condução, assim como o *NEO-Five Fator Inventory*, a *Sensation Seeking Test* e a *Driving Anger Scale*. Os resultados indicaram, por exemplo, que a velocidade média percebida é mais influenciada pelas dimensões relacionadas com a procura de sensações do que com os traços de personalidade mais tradicionais, e a *procura do risco* revelou ser uma variável muito importante no contexto do comportamento de excesso de velocidade. Algumas dimensões da procura de sensações e da raiva na condução demonstraram ser bons preditores da velocidade percebida. As implicações dos resultados alcançados são discutidas, assim como sugestões para futuros estudos são formuladas.

Palavras-chave: infratores por excesso de velocidade; acidentes rodoviários; traços de personalidade; características psicológicas

INTRODUÇÃO

A condução por excesso de velocidade é uma infração punível pela lei, além de ser uma manifestação comportamental de condução agressiva que aumenta a probabilidade de ocorrência de um acidente rodoviário com danos para o próprio e para os restantes utentes da estrada. Apesar disso, conduzir ultrapassando os limites de velocidade legais é muito comum [European Road Safety Observatory, (ERSO) 2006]. Comparativamente com outros comportamentos de risco, o excesso de velocidade é geralmente legitimado socialmente, sendo considerado um comportamento aceitável, ainda que legalmente punível (Stead et al., 2005).

A maior parte dos estudos sobre o comportamento de condução e, especificamente, sobre o excesso de velocidade, é baseada em medidas de autorresposta. Embora estes estudos sejam alvo de algumas críticas, parece existir evidência empírica de uma correlação entre velocidade percebida e velocidade medida em contexto real (Corbett, 2001; Haglund & Aberg, 2000; Walston & Bathurst, 1998; Greaves & Ellison, 2011), o que reforça a utilidade científica dos mesmos.

Os estudos sobre os fatores psicológicos que contribuem para este tipo de comportamento têm demonstrado a importância de algumas dimensões do Modelo dos Cinco Fatores da personalidade (e.g. Arthur & Doverspike, 2001), assim como da procura de sensações e da raiva na condução (e.g. Sullman, 2006).

O Modelo dos Cinco Fatores ((McCrae & Costa, 1995) medido através do Inventário da Personalidade NEO-PI-R e pelo NEO-FII (versão breve do primeiro), é um dos mais utilizados para analisar a personalidade. O modelo considera que as diferentes expressões comportamentais podem ser resumidas em cinco dimensões básicas (as quais constituem as iniciais da sigla do inventário) que são consideradas traços de personalidade do indivíduo: *neuroticismo*, *extroversão*, *amabilidade*, *conscienciosidade* e *abertura à experiência*.

O *neuroticismo* tem sido positivamente correlacionado com a condução perigosa (Booth-Kewley & Vickers, 1994; Matthews et al., 1991; White & Dahlen, 2001) e agressiva (Bone & Mowen, 2006; Dahlen & White, 2006), o número de acidentes de carro, mortalidade e não gostar de conduzir (Matthews et al., 1991). Também a *extroversão* tem sido positivamente relacionada com a condução perigosa (e.g. White & Dahlen, 2001), acidentes rodoviários e o uso de violência física em relação aos outros utentes da via (Benfield et al., 2007). Recentemente, Lev et al. (2008) verificaram que os indivíduos que violam mais frequentemente as regras de trânsito são mais extrovertidos do que aqueles que não o fazem. Por outro lado, Benfield et al. (2007) constataram que os comportamentos agressivos e de risco apresentados durante a condução estão associados a pontuações elevadas na dimensão *abertura à experiência* e a pontuações baixas nas dimensões *amabilidade* e *conscienciosidade*. Num estudo recente de 2011, Jovanovic et al., verificaram que os traços que melhor predizem a agressividade na condução são o *neuroticismo*, *amabilidade* e *conscienciosidade*. Apesar dos resultados destes estudos, a relação entre os traços de personalidade e o comportamento de condução ainda é pouco clara.

No que concerne à relação entre a procura de sensações e o excesso de velocidade, a maior parte dos estudos tem apontado para a existência de uma relação significativa. De facto, os estudos têm mostrado que a procura de sensações é um traço que se correlaciona fortemente com os comportamentos de risco, de entre os quais se salienta o excesso de velocidade (e.g., Arnett, 1996; Jonah et al., 2001; Zuckerman & Neeb, 1980), especialmente nos homens e nos condutores menos experientes (Cestac et al., 2011) sendo este um bom preditor deste tipo de comportamentos (Iversen & Rundmo, 2002). Os condutores que optam por conduzir fora dos limites de velocidade apresentam uma personalidade caracterizada pela procura de sensações e pelo desejo de se envolverem em experiências variadas, novas e intensas com ameaças sociais, legais e financeiras (Zucherman et al., 1972). Isto pode dever-se ao facto de os indivíduos com estas características terem, perante a condução insegura, uma perceção de risco inferior do que os demais condutores (Arnett, 1990). Burns e Wilde (1995) sugerem mesmo que a procura de sensações prediz a tendência para o indivíduo se tornar num infrator rodoviário recorrente.

Outra variável que tem sido analisada nesta área é a raiva expressa durante a condução. Definida como uma propensão para sentir raiva e ser agressivo em contextos específicos de condução, a raiva na condução tem sido medida pela *Driving Anger Scale* (DAS; Deffenbacher et al., 1994) e parece diminuir com a idade e com a experiência de condução (e.g. Sullman, 2006; Wells-Parker et al., 2002). A raiva na condução pode interferir com a atenção, perceção, processamento de informação e desempenho motor e pode aumentar direta ou indiretamente a probabilidade de o indivíduo ter um

acidente rodoviário devido ao facto de este se envolver em comportamentos de risco (Iversen & Rundmo, 2002). Estudos têm encontrado uma associação positiva entre raiva na condução, hostilidade, agressividade (Galovski & Blanchard, 2004; Lajunen et al., 1998) e comportamentos perigosos na estrada, como excesso de velocidade (Dahlen et al., 2005; Deffenbacher et al., 2001; Deffenbacher et al., 1994; Sullman, 2006) e outras violações ao código da estrada. Iversen e Rundmo (2002) constaram que os indivíduos que pontuam mais nas dimensões relacionadas com a procura de sensações, ausência de normas sociais e raiva na condução apresentam comportamentos de risco na condução e ignoram com mais frequência as regras de trânsito quando comparados com indivíduos que pontuam menos nestas escalas. De acordo com estes autores, a raiva na condução é um fator significativo para a explicação de comportamentos disfuncionais na estrada, uma vez que estes indivíduos estão em maior risco de desenvolver problemas emocionais com consequências adversas para os próprios e para os outros.

Após esta revisão da literatura, é possível concluir que muito tem sido feito nos últimos anos para melhor compreender esta problemática, muito embora algumas questões precisem de ser melhor exploradas e clarificadas, nomeadamente a influência específica de cada dimensão psicológica analisada.

Neste contexto, o presente estudo pretende analisar a influência de algumas destas dimensões psicológicas e de personalidade na velocidade média percebida e na perceção de excesso de velocidade numa amostra de infratores por excesso de velocidade. O primeiro objetivo consiste em verificar se os traços de personalidade e as dimensões da procura de sensações são preditores da velocidade média percebida nos três diferentes tipos de via considerados. Para alcançar este objetivo, serão testadas duas hipóteses (H1) os traços de personalidade correlacionam-se com as dimensões da velocidade média percebida e (H2) a procura de sensações prediz positivamente a velocidade média percebida.

O segundo objetivo consiste em analisar a relação entre a raiva na condução, a procura de sensações e o comportamento de risco na condução. Para isso, serão testadas as seguintes hipóteses: (H3) a procura de sensações e a raiva na condução predizem positivamente a perceção de frequência de excesso de velocidade; (H4) os infratores que tiveram acidentes rodoviários têm um nível elevado de procura do risco quando comparados com os infratores que não tiveram acidentes; e (H5) os infratores que tiveram acidentes têm um nível elevado de raiva na condução comparativamente com o grupo de infratores sem acidentes.

Por fim será analisada a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as variáveis psicológicas mais relevantes para o excesso de velocidade percebido entre o grupo de infratores e o grupo de técnicos da PRP. Este será o terceiro objetivo do presente estudo.

MÉTODO

Em Portugal, os condutores ficam inibidos de conduzir se cometerem três infrações rodoviárias graves ou cinco muito graves num período de cinco anos (Artigo 148 do Decreto-Lei nº 113/2008 de 1 de julho). Perante tal situação, os condutores ou não conduzem durante o período estabelecido ou frequentam uma formação na Prevenção Rodoviária Portuguesa (PRP), podendo continuar a conduzir. De uma forma geral, conduzir a mais de 20 km/h do limite legalmente estabelecido é considerado uma infração grave.

Participantes

A amostra do presente estudo foi constituída por 64 condutores infratores por excesso de velocidade a frequentar um curso da PRP para reabilitação de condutores infratores no módulo da “velocidade”.

As principais características deste grupo foram as seguintes: a maior parte era do sexo masculino (52.8%); casados (32.1 %); tinham filhos (42.5%); a média de idades foi de 45.58 anos (D.P. = 12.18); e tinham uma educação média de 11.81 anos (D.P. = 3.10). Todos eles estavam a frequentar os cursos da PRP pela primeira vez. Para entrar no estudo, os participantes deveriam ser infratores por excesso de velocidade, estar a frequentar o curso da PRP no início, ter carta de condução há mais de três anos, conduzir regularmente um veículo de ligeiros de passageiros, e ter um nível de educação de pelo menos seis anos.

Apesar de este ser o principal grupo de análise, adicionalmente foi constituído um grupo de 42 técnicos da PRP para ser utilizado como grupo de comparação. Estes participantes eram: a maioria do sexo feminino (85.7%); solteiros (42.9%); não tinham filhos (61.9%); tinham uma média de idades de 34.38 anos (D.P. = 6.45); e uma média de anos de escolaridade de 15.64 anos (D.P. = .983). Estes técnicos eram formadores destes infratores, e para participar neste estudo não poderiam ter historial de infrações rodoviárias.

Procedimento

A amostra foi recolhida na PRP, após o Diretor nos ter dado autorização formal e depois de enviada uma nota metodológica com a sustentação teórica e objetivos do estudo.

Os participantes foram devidamente informados acerca das condições do estudo, tendo-lhes sido garantida a total confidencialidade dos dados e o anonimato. Os protocolos foram enviados por correio para a PRP, juntamente com o consentimento informado que também explicava o papel dos investigadores e o carácter voluntário da participação neste estudo.

Medidas

O protocolo de avaliação consistiu num breve questionário de dados sociodemográficos (género, idade, estado civil, número de filhos, anos de escolaridade, profissão, situação profissional) e dados sobre o comportamento de condução, assim como três questionários de autorresposta, especificamente: o *NEO - Five Fator Inventory*; a *Sensation Seeking Test*; e a *Driving Anger Scale*.

Relativamente às questões sobre o comportamento de condução, as variáveis analisadas foram: anos de condução; número de vezes que os condutores ficaram inibidos de conduzir; número de multas nos últimos dois anos; velocidade média percebida dentro e fora das cidades e nas autoestradas e vias equiparadas; e frequência de excesso de velocidade percebida em relação ao limite de velocidade (em geral). Para esta última variável, foi colocada a seguinte questão “com que frequência excede o limite de velocidade” numa escala de resposta de Likert de 5 pontos desde “nunca” (1 ponto) a “sempre” (5 pontos).

O *NEO - Five Fator Inventory* (NEO-FII) [Costa & McCrae, 1989; Versão Portuguesa (VP): Magalhães et al., no prelo 2012] foi utilizado para analisar os traços de personalidade. Este inventário é composto por 60 itens numa escala de resposta de 5 pontos, sendo que avalia as seguintes 5

dimensões: *neuroticismo; abertura à experiência; amabilidade; conscienciosidade; e extroversão*. No presente estudo, os valores do α de *Cronbach* para cada dimensão oscilaram entre .70 a .82.

A *Sensation Seeking Test* (SST) foi utilizada para avaliar a procura de sensações [versão da subescala procura de sensações impulsivas de *Zuckerman-Kuhlman's Personality Questionnaire - ZKPQ*, Zuckerman et al., 1993; VP: Almeida & Gomes, 2008]. Este teste descreve a tendência individual para procurar sensações, emoções, risco e excitação na vida e é composto por 19 itens numa escala de resposta de 7 pontos com 5 fatores: *procura do risco; imprevisibilidade; exploração do desconhecido; planeamento; e falta de planeamento*. Os valores do α de *Cronbach* para cada dimensão oscilaram entre .70 a .84.

Por fim, foi administrada a *Driving Anger Scale* (DAS) (Deffenbacher et al., 1994; VP: Brites et al., 2006) para avaliar a agressividade na condução. O questionário é composto por 22 itens com uma escala de resposta de 5 pontos, que representam situações reais que podem hipoteticamente despoletar comportamentos agressivos na condução e que estão divididas em 6 dimensões: *gestos hostis, condução ilegal, presença policial, condução lenta, descortesia, e obstruções ao trânsito*. No presente estudo, os valores do α de *Cronbach* para cada dimensão oscilaram entre 0.73 a 0.93.

RESULTADOS

Comportamento de condução

Os infratores tinham uma média de anos de carta de condução de 24.7 anos (D.P. = 11.5). Nos últimos dois anos, 93.8% foi multado (média 1.8 multas, D.P. = .78) e 59.4 % dos participantes tinham tido, pelo menos, um acidente no qual foram dados como culpados (em média, tiveram 2.5 acidentes; D.P. = 1.3). No conjunto dos infratores, 35.9% já ficaram com a carta de condução confiscada (em média, isso aconteceu 1.5 vezes; D.P. = 0.73).

Em relação à velocidade, 70.3% assume que por vezes ou frequentemente excede os limites de velocidade. A velocidade média percebida (km/h) dentro das cidades foi de 56.64 km/h (D.P. = 10.32), fora das cidades foi de 89.38 km/h (D.P. = 12.71) e nas autoestradas foi de 127.97 km/h (D.P. = 15.03).

A idade relacionou-se negativa e significativamente ($r = -0.25$, $p < 0.05$) com a velocidade média percebida dentro das cidades, apesar de esta associação ter sido de magnitude fraca. Isto significa que a velocidade média percebida dentro das cidades diminui com a idade. Por sua vez, a perceção da frequência de excesso de velocidade associou-se positivamente com as velocidades médias percebidas nos três tipos de via (velocidade média percebida dentro das cidades $r = 0.62$, $p < .01$; fora das cidades $r = 0.50$, $p < .01$; nas autoestradas $r = 0.60$, $p < 0.01$), com correlações moderadas.

Relativamente ao grupo de comparação composto por técnicos da PRP, 38.1% assumiu que excede os limites de velocidade por vezes ou sempre. A velocidade média percebida dentro das cidades foi de 49.05 km/h (D.P. = 7.67), fora das cidades foi de 82.14 km/h (D.P. = 9.45) e nas autoestradas 115.60 km/h (S.D. = 10.94). Neste grupo a velocidade média percebida foi inferior aos limites legais instituídos para cada tipo de via.

Correlações de Pearson

A tabela 1 mostra as correlações de *Pearson* entre as velocidades médias percebidas, a frequência de excesso de velocidade percebida e os traços de personalidade e dimensões da procura de sensações e da raiva na condução. Nos fatores do NEO-FII, contrariamente ao esperado, apenas a *amabilidade* se associou à velocidade percebida, especificamente a velocidade média percebida nas autoestradas, sendo que a magnitude da associação não foi forte ($r = -0.30$, $p < 0.05$).

Por outro lado, as dimensões da SST e da DAS apresentaram correlações positivas com praticamente todas as dimensões de velocidade na condução, algumas de magnitude moderada.

De uma forma geral, é possível dizer que a *procura do risco* e a *imprevisibilidade* da SST e a *condução lenta e descortesia* da DAS são dimensões muito importantes quando se pretende compreender melhor este tipo de comportamento.

Tab. 1. Associação entre as médias de velocidade percebidas e a frequência de excesso de velocidade percebida, e as dimensões do NEO-FII, SST e da DAS (correlações de *Pearson*).

	Veloc. média percebida dentro das cidades	Veloc. média percebida fora das cidades	Veloc. média percebida nas autoestradas	Frequência de excesso de veloc. percebida
Idade	-.251*	-2.36	-.195	-.263*
Anos carta	-.160	-.155	-.088	-.146
NEO-FII				
Neuroticismo	-.048	-.013	-.048	-.155
Extroversão	-.229	.245	.211	.220
Abertura à exp.	-.102	-.197	-.016	.027
Amabilidade	.017	-.071	-.300*	-.188
Conscienciosidade	-.026	.043	-.222	-.158
SST				
Procura do risco	.224	.256*	.366**	.329**
Imprevisibilidade	.084	-.013	.254*	.320*
Exploração do desconhecido	.068	.072	.330**	.125
Planeamento	-.196	-.020	.094	-.052
Falta de planeamento	-.094	.134	.285*	.010
DAS				
Gestos hostis	.046	.156	.073	.126
Condução ilegal	-.102	-.100	-.101	-.058
Presença policial	.112	.268*	.169	.231
Condução lenta	.251*	.290*	.302*	.308*
Descortesia	.284*	.283*	.322	.398**
Obstruções ao trânsito	.092	.054	-.005	.138

* $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$

Análise da capacidade preditiva dos traços de personalidade e da procura de sensações na explicação da velocidade média percebida

No conjunto das variáveis independentes que foram hipotetizadas, foi realizada uma análise de regressão apenas com aquelas variáveis dependentes que apresentaram correlações significativas (ver tabela 1), após verificado o cumprimento das regras dos modelos lineares. O objetivo foi testar a capacidade preditiva nas variáveis dependentes hipotetizadas.

A capacidade preditiva da *procura do risco* na variável velocidade média percebida fora das cidades foi testada através de uma regressão linear simples, sendo que os resultados se encontram no lado esquerdo da tabela 2. Os resultados indicam que 6.6 % ($p < 0.05$) que a variação média da velocidade média percebida fora das cidades é explicada pela *procura de risco* ($\beta = 0.256$, $p < 0.05$). Por outras palavras, quando se pretende explicar a velocidade média percebida fora das cidades, a variação média da variável *procura do risco* deve ser considerada.

Devido a problemas de multicolinearidade, as variáveis *imprevisibilidade*, *exploração do desconhecido* e *falta de planeamento* não foram incluídas no modelo de regressão testado.

A capacidade preditiva da *procura do risco* e da condução lenta na velocidade média percebida nas autoestradas também foi testada através de um modelo de regressão múltipla, cujos resultados estão na tabela 2 (lado direito). Este modelo influenciou em 19.4% ($p < 0.01$) a variação média da velocidade média percebida neste tipo de via (tabela 2).

Tab. 2. Análise de regressão simples e múltipla.

	Veloc. média percebida for a das localidades			Veloc. média percebida nas auto-estradas		
	β	<i>B</i>	R ²	β	β	R ²
<i>Step 1</i>			.066*			.194**
Procura do risco	2.434	.256*		3.641	.324	
Condução lenta				6.949	.248	

* $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$

Análise da relação entre raiva na condução, procura de sensações e comportamento de risco na condução

Para analisar este objetivo, foi realizada uma regressão múltipla. O sumário da mesma encontra-se na tabela 3. Devido a problemas de multicolinearidade, as variáveis *imprevisibilidade* e *condução lenta* não foram incluídas no modelo de regressão. O modelo testado composto então pela *procura de risco* e pela *descortesia* influenciou significativamente a variação média da frequência de excesso de velocidade percebida ($R^2 = 0.232$, $p < 0.001$).

Com o objetivo de testar se os infratores que tiveram acidentes rodoviários diferem dos que não tiveram, um teste *t-student* para amostras independentes foi realizado (tabela 4). Foi utilizado este teste paramétrico porque um dos grupos tinha 30 sujeitos e o outro menos de 30. Através do teste de *Levene* foi verificada a assunção da homogeneidade das variâncias (Field, 2000) e em nenhuma das dimensões esta regra foi violada. Os resultados mostraram que os infratores que tiveram acidentes apresentam

médias de velocidade percebida superiores em todas as dimensões psicológicas consideradas quando comparados com os infratores sem acidentes. Contudo, os grupos diferiram significativamente apenas na *procura do risco* ($t = -4.004$, $p < 0.001$) e *imprevisibilidade* ($t = -2.687$, $p < 0.01$), dimensões relacionadas com a procura de sensações novas e variadas. Especificamente, os infratores que tiveram acidentes apresentaram um nível de *procura se risco* e de *imprevisibilidade* superiores quando comparados com os que não tiveram.

Tab. 3. Análise de regressão múltipla.

	Frequência de excesso de velocidade percebida		
	B	β	R ²
<i>Step 1</i>			0.232***
Procura do risco	0.173	0.274	
Descortesia	0.345	0.356	

* $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$

Tab. 4. Comparação entre infratores que tiveram acidentes rodoviários e infratores que não tiveram acidentes em relação às dimensões da SST e da DAS (*t-student*).

	Infratores que tiveram acidentem ($n = 38$)	Infratores que não tiveram acidentes ($n = 26$)	<i>t</i>
	<i>M (DP)</i>	<i>M (DP)</i>	
Procura do risco	3.42 (1.33)	4.68 (1.10)	-4.004***
Imprevisibilidade	2.65 (1.42)	3.25 (1.57)	-2.687**
SST Exploração do desconhecido	3.78 (1.54)	4.81 (1.46)	-2.687
Planeamento	4.73 (1.29)	4.91 (1.38)	-0.524
Falta de planeamento			-.1595
Gestos Hostis	1.77 (.94)	2.20 (.86)	-1.868
Condução ilegal	2.20 (.74)	2.24 (.87)	.286
Presença policial	1.23 (.47)	1.46 (.59)	-1.702
DAS Condução lenta	1.62 (.53)	1.75 (.54)	-.958
Descortesia	2.21 (.98)	2.32 (.81)	0.407
Obstruções ao trânsito	2.49 (.88)	2.57 (.80)	-0.377

* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$

Comparação entre os infratores e os técnicos da PRP em relação às variáveis psicológicas mais relevantes para o comportamento de excesso de velocidade

As variáveis psicológicas que apresentaram correlações estatisticamente significativas no grupo de infratores com pelo menos uma das dimensões do comportamento de excesso de velocidade em estudo (ver tabela 1), foram testadas numa análise de comparação de médias entre infratores e técnicos.

No conjunto das oito dimensões analisadas, os infratores tiveram pontuações mais elevadas nas dimensões *imprevisibilidade*, *procura do risco* e *presença policial* comparativamente com o grupo de técnicos da PRP e estas diferenças foram estatisticamente significativas (tabela 5). Por sua vez, na comparação entre os grupos, os técnicos pontuaram mais na dimensão *amabilidade* ($t = -3.900$, $p < .001$).

As restantes quatro dimensões analisadas não mostraram diferenças estatisticamente significativas na comparação entre os dois grupos (tabela 5)

Tab. 5. Comparação entre infratores e técnicos da PRP em relação às dimensões psicológicas mais relevantes para o excesso de velocidade (*t-student*).

	Infratores (n = 64)	Técnicos (n = 42)	t
	M (DP)	M (DP)	
Amabilidade	2.427 (0.468)	2.738 (0.499)	-3.900***
Procura do risco	4.172 (1.339)	3.700 (1.031)	1.937*
Imprevisibilidade	3.005 (1.525)	2.476 (1.181)	2.006*
Exploração do desconhecido	4.391 (1.564)	4.024 (1.267)	1.270
Falta de planeamento	3.189 (1.319)	2.900 (0.898)	1.335
Presença policial	1.365 (0.649)	1.127 (0.321)	2.806**
Condução lenta	1.693 (0.536)	1.548 (0.415)	1.486
Descortesia	2.354 (0.873)	2.103 (0.631)	1.716

* $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$

DISCUSSÃO

O presente estudo pretendeu dar um contributo para a literatura na área da psicologia do tráfego, identificando e analisando o papel de determinados traços de personalidade e características psicológicas na perceção que o indivíduo tem da velocidade que adota, numa amostra de infratores por excesso de velocidade.

Os infratores apresentaram características semelhantes às descritas na literatura (e.g. European Road Safety Observatory, 2006) e a maioria assumiu que excede os limites de velocidade com muita frequência. De salientar, que nos infratores as velocidades médias percebidas nos três tipos de via foram quase sempre superiores aos limites legais, sendo a única exceção a velocidade fora das cidades, cuja média se encontra muito próxima ao limite. Como o que está em causa é a perceção e não a

velocidade real e os condutores frequentemente subestimam a velocidade a que conduzem e o nível de perigo implícito, estes valores poderão ser muito superiores se medidos no campo.

Os resultados mostraram que no conjunto dos traços de personalidade, apenas a *amabilidade* se correlaciona (negativamente) com a velocidade média percebida, especificamente nas autoestradas. Deste modo, a primeira hipótese deste estudo foi parcialmente corroborada. A *amabilidade* consiste na tendência para ser compassivo e cooperativo perante as necessidades dos outros (McCrae and Costa, 1995). Por outro lado, os indivíduos que pontuam pouco nesta dimensão tendem a ter e a demonstrar menos interesse relativamente ao bem-estar das pessoas. Apesar de, nas autoestradas, a condução implicar menos estímulos e obstáculos, conduzir neste tipo de via envolve um risco elevado para o próprio e para os outros, uma vez que a velocidade de circulação atinge um máximo legal de 120 km/h. Provavelmente, as pessoas com menor *amabilidade* embora conheçam os perigos associados à condução com excesso de velocidade, os desvalorizam e não se preocupam verdadeiramente com as suas consequências.

À semelhança de outros estudos, os resultados mostram que a maior parte das dimensões da SST se relacionam com a velocidade de condução percebida, o que confirma a segunda hipótese. Contudo, apenas a *procura do risco* revelou capacidade preditiva, especificamente em relação à velocidade média percebida fora das cidades. Os indivíduos que pontuam mais alto nesta dimensão gostam de ter experiências novas e excitantes mesmo que estas sejam um pouco perigosas e ameaçadoras (Almeida & Gomes, 2008).

Apesar de a influência não ser muito elevada, este resultado constitui uma novidade na investigação nesta área, carecendo de estudos que o suportem. Nas autoestradas, a velocidade média percebida também foi explicada pela *procura do risco*, assim como pela condução lenta da DAS. Deste modo, é possível afirmar que a necessidade de procurar a novidade e o risco na vida é um fator muito importante na compreensão da velocidade média percebida, especificamente nas vias cujo limite de velocidade é igual ou superior a 90 km/h. A velocidade e o perigo estão fortemente associadas, por isso aqueles que gostam de ambos podem satisfazer melhor os seus ímpetos neste tipo de via. Nas autoestradas, a velocidade de condução é muito elevada, o que pode explicar, em parte, o sentimento de raiva perante a condução lenta dos outros.

Conforme o esperado, algumas dimensões da SST e da DAS predisseram a frequência de velocidade média percebida (terceira hipótese). Especificamente, o modelo composto pela *procura do risco* e pela *descortesia* explicou em 23.2% ($p < .001$) da variação média da frequência de velocidade média percebida. Este resultado não só confirma a relevância da procura de sensações e da raiva no estudo do comportamento do condutor e no excesso de velocidade (Iversen & Rundmo, 2002), mas também a importância de analisar as dimensões específicas que constituem estas variáveis, algo que os estudos precedentes não têm feito.

Parece, pois, que as pessoas que excedem os limites de velocidade gostam e procuram experiências perigosas e de risco, e que são mais agressivas e menos tolerantes perante determinadas situações que ocorrem na estrada e perante o comportamento dos outros condutores. As pessoas com estas características mais facilmente violam as regras de trânsito, possivelmente porque estão mais focados nas suas emoções do que na tarefa de condução propriamente dita. Além disso, para elas conduzir a alta velocidade pode ser uma fonte de satisfação intrínseca, de liberdade e de prazer fácil e eficaz (Rothengatter, 1988). Isto contrasta, por exemplo, com a emoção de raiva. Os condutores podem

subestimar o risco associado a este comportamento ou podem fazê-lo tendo plena consciência do risco simplesmente pela adrenalina e emoções fortes que despoleta. Esta explicação parece ser a mais plausível para explicar estes resultados.

No presente estudo, os infratores que tiveram acidentes rodoviários apresentaram características psicológicas diferentes dos que não tiveram acidentes, mas apenas em relação a algumas dimensões da SST, o que permite confirmar parcialmente a hipótese quatro. Apesar de o excesso de velocidade e dos acidentes rodoviários serem dois comportamentos de risco, apresentam características distintas. Parece claro que os infratores por excesso de velocidade que tiveram acidentes gostam e procuram mais situações de risco e imprevisíveis do que os que não tiveram acidentes. Estas características podem não ter contribuído diretamente para a ocorrência dos acidentes, mas indicam a existência de fatores de risco no futuro que devem ser tidos em conta. Ao se envolverem em situações de risco os condutores vão provavelmente cometer mais erros na condução e como tendem a subestimar os perigos, as consequências para si e para os outros podem ser mais graves. Assim, a percepção de risco é uma variável que deve ser avaliada neste tipo de estudos, assim como deve ser tida em consideração na prática clínica da psicologia em programas de prevenção e reabilitação de infratores. A raiva na condução não parece diferir entre infratores com e sem acidentes, pelo que a hipótese cinco foi refutada.

Quando comparados com os técnicos, os infratores pontuaram mais alto em quase todas as dimensões analisadas, com exceção da dimensão *amabilidade*. Contudo, as diferenças entre os dois grupos foram estatisticamente significativas apenas nas dimensões *imprevisibilidade*, *procura do risco*, *presença policial* e *amabilidade*. Estes resultados reforçam os anteriores encontrados na literatura, uma vez que mostram a importância que as dimensões relacionadas com a procura de situações perigosas, imprevisíveis e, de certo modo, ilegais, têm nos infratores que excedem os limites de velocidade. A *amabilidade*, enquanto traço de personalidade, parece atuar como fator de proteção deste tipo de comportamento, porque os indivíduos que pontuam mais alto nesta dimensão tendem a ser mais cautelosos, responsáveis e conscientes dos efeitos que uma condução perigosa pode ter sobre os outros.

Os resultados deste estudo preliminar podem ser úteis para compreender melhor a problemática do excesso de velocidade e dos comportamentos adotados nos três principais tipos de via. A frequência de excesso de velocidade percebida e as velocidades médias percebidas são mais influenciadas pela procura de sensações e pela raiva na condução do que pelos traços de personalidade mais tradicionais. Isto provavelmente acontece porque a tarefa de condução é um comportamento multifatorial, sujeito à influência de fatores externos como o tempo, estado do pavimento e comportamento dos outros utentes, o que pode interferir com o estado emocional do condutor. A *procura do risco* parece ser a variável mais importante, pois está associada ao comportamento de condução, acidentes rodoviários e excesso de velocidade. Em estudos futuros, seria interessante clarificar este conceito analisando, por exemplo, se os condutores com esta característica têm uma percepção real do perigo decorrente desses comportamentos e, em caso de resposta negativa, que motivações os levam a adotá-los.

Em futuros estudos seria interessante incluir, para além dos questionários de autorresposta, uma componente de observação comportamental em contexto real (preferencialmente sem os condutores terem conhecimento). Neste sentido, consideramos que a ausência desta componente juntamente com o tamanho da amostra, constituem as grandes limitações deste estudo.

Apesar do crescente interesse científico devido às implicações sociais e económicas desta problemática, mais investigação é necessária para compreender em profundidade os comportamentos na estrada, contribuindo assim para a redução de acidentes rodoviários e mortes na estrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, I. (2008). *Os apelos ao medo nas campanhas de prevenção rodoviária: as reacções dos jovens universitários*. Master's thesis, Technical University of Lisbon, Lisbon.
- Arnett, J. (1990). Drunk driving, sensation seeking, and egocentrism among adolescents. *Personality and Individual Differences*, 11, 541–546.
- Arnett, J.J. (1996). Sensation seeking, aggressiveness, and adolescent reckless behavior. *Personality and Individual Differences*, 20, 693–702.
- Arthur, W., Doverspike, D. (2001). Predicting motor vehicle crash involvement from a personality measure and a driving knowledge test. *Journal of Prevention and Intervention within the Community*, 22, 35–42.
- Benfield, J. A., Szlemko, W. J., Bell, P. A. (2007). Driver personality and anthropomorphic attributions of vehicle personality relate to reported aggressive driving tendencies. *Personality and Individual Differences*, 42, 247–258.
- Bone, S. A., Mowen, J. C. (2006). Identifying the traits of aggressive and distracted drivers: A hierarchical trait model approach. *Journal of Consumer Behaviour*, 5, 454-464.
- Booth-Kewley, S., Vickers, R. R. (1994). Associations between major domains of personality and health behaviour. *Journal of Personality*, 62, 281-298.
- Brites, J. M. A., Sousa, C., Brardo, E. (2008). Características Psicométricas da Driving Anger Scale (DAS) na população portuguesa. In *XIII International Conference about Psychological Assessment Forms and Contexts*. University of Minho, Braga.
- Burns, P.C., Wilde, G.J.S. (1995). Risk taking in male taxi drivers: relationships among personality, observational data and driver records. *Personality and Individual Differences*, 18, 267–278.
- Cestac, J., Paran, F., Delhomme, P. (2011). Young drivers' sensation seeking, subjective norms and perceived behavioral control roles in the prediction of speeding intention: evolution of risk-taking motivations according to gender and driving experience. *Safety Science*, 49, 424-432.
- Corbett, C. (2001). Explanations for "understating" in self-reported speeding behaviour. *Transportation Research Part F*, 4, 133-150.
- Dahlen, E.R., White, R.P. (2006). The Big Five factors, sensation seeking, and driving anger in the prediction of unsafe driving. *Personality and Individual Differences*, 41, 903-915.
- Dahlen, E.R., Martin, R.C., Ragan, K., Kuhlman, M.M. (2005). Driver anger, sensation seeking, impulsiveness, and boredom proneness in the prediction of unsafe driving. *Accident Analysis and Prevention*, 37, 341-348.
- Deffenbacher, J.L., Lynch, R.S., Oetting, E.R., Yingling, D.A. (2001). Driving anger: correlates and a test of state-trait theory. *Personality and Individual Differences*, 31, 1321–1331.
- Deffenbacher, J.L., Oetting, E.R., Lynch, R.S. (1994). Development of a driving anger scale. *Psychological Reports*, 74, 83–91.
- European Road Safety Observatory (2006). *Speeding*. http://www.dacota-project.eu/Links/erso/knowledge/Fixed/20_speed/Speeding.pdf.
- Evans, L. (1993). Comments on driver behavior and its role in traffic crashes. *Alcohol, Drugs and Driving*, 9, 185–195.
- Field, A. (2000). *Discovering Statistics using SPSS for Windows*. Thousand, London.
- Galovski, T. E., Blanchard, E. B. (2004). Road rage: a domain for psychological intervention? *Aggression and Violent Behaviour*, 9, 105-127.

- Greaves, S., Ellison, A. (2011). Personality, risk aversion and speeding: An empirical investigation. *Accident Analysis and Prevention*, 43, 1828-1836.
- Haglund, M., Aberg, L. (2000). Speed choice in relation to speed limit and influences from other drivers. *Transportation Research Part F*, 3, 39-51.
- Iversen H., Rundmo, T. (2002). Personality, risky driving, and accident involvement among Norwegian drivers. *Personality and Individual Differences*, 33, 1251–1263.
- Jonah, B., Thiessen, R., Au-Yeung, E. (2001). Sensation seeking, risky driving and behavioral adaptation. *Accident Analysis and Prevention*, 33 (5), 679–684.
- Jovanovic, D., Lipovac, K., Stanojevic, P., Stanojevic, D. (2011). The effects of personality traits on driving-related anger and aggressive behaviour in traffic among Serbian drivers, *Transportation Research Part F*, 14, (1), 43-53.
- Lajunen, T., Parker, D., Stradling, S.G. (1998). Dimensions of driver anger, aggressive and highway code violations and their mediation by safety orientation. *Transportation Research Part F*, 1, 107-121.
- Lev, D., Hershkovitz, E., Yechiam, E. (2008). Decision making and personality in traffic offenders: A study of Israeli drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 40, 223–230.
- Magalhães, E., Salgueira, A. P., Gonzalez, A-J, Costa, J. J., Costa, M. J., Costa, P., Pedroso-Lima, M.. NEO-FFI: psychometric properties of a short personality inventory. A Portuguese adaptation of the 60 item instrument. *Psychological Test and Assessment Modelling*. In press 2012.
- Matthews, G., Dorn, L., Glendon, A.I. (1991). Personality correlates of driver stress. *Personality Individual Differences*, 12, 535–549.
- McCrae, R. R., Costa, P. T. (1995). Trait explanations in personality psychology. *European Journal of Personality*, 9, 231-252.
- Social Attitudes to Road Traffic Risk in Europe (2004). *European drivers and road risk: report on principal results*. <http://sartre.inrets.fr/documents-pdf/repS3V1E.pdf>.
- Stead, M., Tagg, S., MacKintosh, A. M., Eadie, D. (2005). Development and evaluation of a mass media Theory of Planned Behaviour intervention to reduce speeding. *Health Education Research*, 20 (1), 36-50.
- Sullman, M. J. M. (2006). Anger amongst New Zealand drivers. *Transportation Research Part F*, 9, 173–184.
- Walton, D., Bathurst, J. (1998). An exploration of the perceptions of the average driver's speed compared to perceived driver safety and driving skill. *Accident Analysis and Prevention*, 30, 821–830.
- Wells-Parker, E. Ceminsky, J., Hallberg, V., Snow, R. W., Dunaway, G., Guiling, S., et al., (2002). An exploratory study of the relationship between road rage and crash experience in a representative sample of US drivers. *Accident Analysis and Prevention*, 34, 271-278.
- White, R. P., Dahlen, E. R. (2001). *The role of personality and emotional factors in the prediction of crash-related conditions, aggressive driving, and risky driving behavior*. Paper presented at the Mississippi psychological association convention, Gulfport, MS.
- World Health Organization (2011). Transport, environment and health. http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0003/87573/E72015.pdf.
- Zuckerman, M., Neeb, M. (1980). Demographic influences in sensation seeking and expressions of sensation seeking in religion, smoking and driving habits. *Personality and Individual Differences*, 1, 197-206.
- Zuckerman, M., Bone, R. N., Neary, R., Mangelsdorff, D., Brustman, B. (1972). What is the sensation seeker? Personality trait and experience correlates of the Sensation Seeking Scales. *Journal of Consulting and Clinical Psychology*, 39, 308-321.

Rothengatter, T. (1988). Risk and the absence of pleasure: a motivational approach to modeling road user behaviour. *Ergonomics*, 31 (4), 599–607.

ACIDENTES RODOVIÁRIOS DAS ESTRADAS NACIONAIS DE PORTUGAL: ESTUDO DA ASSOCIAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS E MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

Jocilene Otilia da Costa^a
Paulo António Alves Pereira^a
Elisabete Fraga Freitas^a
Maria Alice Prudêncio Jacques^b

^aUniversidade do Minho, Portugal – Departamento de Engenharia Civil

^bUniversidade de Brasília, Brasil – Programa de Pós-Graduação em Transportes

RESUMO

Este artigo aborda o estudo de acidentes rodoviários ocorridos na região Norte de Portugal dividido em duas partes. Na primeira, estuda-se o grau de associação entre algumas variáveis relacionadas aos elementos que afetam a segurança rodoviária (condutor, veículo, estrada e ambiente viário). Mostrou-se empiricamente, através do teste de associação qui-quadrado, que as variáveis estudadas (fatores atmosféricos, traçado da via, habilitação de condução, passageiros vítimas, peões vítimas e condutores vítimas) estão todas associadas com a natureza do acidente. No entanto, a maioria das associações é fraca. Na segunda parte apresenta-se uma contribuição inicial para modelo de previsão de acidentes – MPA para as estradas nacionais da região Norte de Portugal, nomeadamente: NR-14, NR-101 e NR-206. Este estudo analisou a frequência de acidentes, o tráfego médio diário anual (TMDA) e as características geométricas de 88 segmentos de estrada de duas faixas e sentidos opostos. Os segmentos selecionados foram de 200 m de comprimento fora de áreas urbanas. O procedimento de equações de estimação generalizadas – EEG foi aplicado a 6 bases de dados distintas formadas pelo agrupamento dos dados originais no tempo e no espaço. Os resultados mostram que as diferentes observações dentro de cada segmento de estrada apresentam como dominante a estrutura correlação permutável. Este documento também analisa o impacto do tamanho da amostra sobre a capacidade do modelo de identificar os fatores que contribuem para a ocorrência de acidentes e destaca que esta questão deve considerar medidas para reduzir o número de observações zero da variável dependente (número total de acidentes). Os principais fatores que contribuem para ocorrência de acidentes nas estradas estudadas foram o volume de tráfego (expresso em TMDA), largura de faixa, sinuosidade vertical e a densidade de pontos de acesso. Um MPA aceitável foi identificado para as estradas, que avaliou o número total de acidentes para segmentos de 200 m para um período cumulativo de três anos. Em ambos os estudos a base de dados utilizada foi formada pelos acidentes ocorridos no período de 1999 à 2010.

Palavras-chave: fatores contribuintes de acidentes; equações de estimação generalizadas; modelos de previsão de acidentes; associação de variação

INTRODUÇÃO

O número crescente de acidentes de trânsito em estradas rurais e urbanas criou a necessidade de desenvolver estratégias para ajudar os órgãos rodoviários a reduzir esses eventos. A World Health Organization (WHO, 2009) revelou que mais de 1,2 milhões de pessoas morrem e 50 milhões de

pessoas ficam feridas nas estradas mundiais a cada ano e em Portugal, estes valores para 2007 foram de 854 e 46.318, respectivamente, para um país com uma população de 10.623.041.

A nível mundial, quando se avaliam os acidentes rodoviários conclui-se que a ocorrência destes eventos depende da contribuição de múltiplos fatores, sendo eles: (i) condutor; (ii) estrada e ambiente viário; (iii) veículo. Há um consenso sobre a responsabilidade do comportamento do condutor na maioria dos acidentes rodoviários (Sabey e Staughton, 1975). Entretanto, além dos fatores humanos relacionados com este comportamento, salienta-se a influência das características da infraestrutura rodoviária nestes acidentes. Devidamente registrados e analisados os dados relativos aos acidentes rodoviários permitem a identificação das áreas ou dos locais onde as medidas de segurança têm um maior potencial para bom desempenho e eficácia (Thomas et al., 2003).

Cardoso e Goldner (2007) destacam que na modelação de acidentes, seja em estradas urbanas ou rurais, nem sempre é possível introduzir o efeito de variáveis qualitativas. Já Hauer (2004) declara que quando se identifica a relação das variáveis qualitativas com outras variáveis do modelo é possível afirmar que os parâmetros das variáveis do modelo incorporam o efeito dessas variáveis qualitativas. Sendo assim, a identificação da relação entre as diferentes variáveis de uma base de dados de acidentes permite explicar melhor estes acidentes. Uma maneira de identificar a relação entre variáveis qualitativas é a aplicação do teste de associação qui-quadrado (Barbetta, 2006).

Já para o estudo dos fatores que contribuem para ocorrência de acidentes são comumente utilizados modelos de previsão de acidentes – MPAs. Os MPAs são ferramentas importantes na promoção da segurança viária em diferentes instalações rodoviárias (segmentos ou interseções), já que podem fornecer estimativas precisas para a frequência total de acidentes para uma localização por unidade de tempo, que é geralmente uma função do tráfego da estrada e das características geométricas. No entanto, a interpretação de um coeficiente MPA como o verdadeiro efeito de uma mudança incremental em um recurso de estrada associado geralmente não é satisfatório (Harwood et al., 2000; Hauer, 2004). Segundo os autores referenciados, esta situação pode ocorrer devido a problemas, nomeadamente: (i) a causa-efeito assumida entre algumas características viárias e acidentes podem não ser sempre verdadeira, (ii) a presença de uma forte correlação entre as variáveis independentes do modelo; e (iii) a falta de variáveis explicativas importantes no modelo, o que faz com que o coeficiente de uma ou mais variáveis do modelo represente a variável disponível, em vez de seu próprio efeito. Mesmo com estas limitações, a análise dos sinais e identificação da importância relativa das variáveis independentes apresentadas no modelo pode levar a conhecimentos importantes sobre os principais fatores que contribuem para a segurança viária.

Assim, este trabalho apresenta como um dos objetivos a determinação do grau de associação entre algumas variáveis relacionadas com os três elementos que afetam a segurança rodoviária. Este estudo é feito considerando os acidentes ocorridos nas estradas nacionais (EN-14, EN-101 e EN-206) da região norte de Portugal no período de 1999 a 2008, especificamente os trechos localizados no distrito de Braga e no concelho de Felgueiras. O segundo objetivo é identificar os fatores que contribuem para a frequência de acidentes nos segmentos rodoviários nas estradas portuguesas de duas faixas de sentidos opostos. Além disso, este estudo visa analisar o impacto das estruturas das diferentes bases de dados no tempo e no espaço sobre os fatores identificados. O tipo de correlação entre os dados relativos a cada segmento da estrada também será avaliado através do procedimento de equações de estimação generalizadas – EEG para a modelagem dos dados longitudinais.

DESCRIÇÃO DOS DADOS

No estudo de acidentes é fundamental a caracterização da rede rodoviária, já que a mesma apresenta diferentes funções. Uma das funções dessa caracterização é auxiliar a identificação das variáveis a serem mensuradas na modelação de previsão de acidentes. Neste trabalho apresenta-se uma breve caracterização em que foram consideradas as características da estrada e do ambiente rodoviário envolvente dos seis trechos selecionados e que se localizam na região Norte de Portugal.

Os dados dos acidentes considerados para este estudo foram fornecidos pela Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária – ANSR no período compreendido entre 1999 e 2010. Para um melhor entendimento da base de dados desse órgão público, nesta seção apresenta-se os campos e parte das informações contidas na base de dados de acidentes (Tab. 2). Essas informações são obtidas por meio do Boletim Estatístico de Acidentes de Viação – BEAV. Este boletim é preenchido pela Polícia de Segurança Pública – PSP e/ou pela Guarda Nacional Republicana – GNR, após serem chamados ao local do acidente sempre que há vítimas. Por isso, raramente há o registo de acidentes apenas com danos materiais.

Estrutura da base de dados para o estudo de associação

Através do preenchimento do BEAV é possível descrever a situação do acidente, a natureza e a localização. Na Tab. 2 é apresentado um resumo das informações que são preenchidas no BEAV, destacando-se a parte que é preenchida para acidentes com e sem vítimas.

Tab. 2. Elementos e características coletados com o BEAV.

Elementos	Características
Identificação do Acidente	Data e Hora; Localização; Tipo de acidente; Natureza do Acidente; Número de veículos intervenientes; Condutores intervenientes.
Circunstâncias externas	Características da técnicas da via; Traçado da via; Regime de Circulação; Pavimento; Sinalização; Luminosidade; Fatores Atmosféricos.
Veículos intervenientes	Categoria e Classe; Tipo de serviço; Ano da matrícula; Inspeção periódica; Certificado ADR; Carga, Lotação e Pneus; Seguro.
Condutores intervenientes	Características da habilitação de condução; Condições psico e físicas; Ações e manobras antes do acidente; Informação complementar a ações e manobras; Acessórios de segurança.
Severidade do acidente	Condutores vítimas; Passageiros Vítimas; Peões Vítimas.

Base de dados para os modelos de previsão de acidentes

A base de dados inclui o número de acidentes, volume de tráfego e características geométricas dos 88 segmentos rodoviários de 200 m de comprimento, localizados em estradas de uma faixa de rodagem e uma via em cada sentido da região Norte de Portugal. Os dados estão disponíveis para os anos de 1999 a 2010. As estradas e os respectivos trechos são apresentados na Tab. 3.

Em Portugal, segundo a Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária, ANSR (Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária), a análise de pontos críticos de segurança das estradas é ser baseada em segmentos rodoviários de 200 m de comprimento (ANSR, 2009). Portanto, os trechos selecionados foram divididos em segmentos de 200 m de comprimento, sendo esse comprimento fixo para os quais as características geométricas, o volume de tráfego (expresso em tráfego anual médio diário – TMDA) e o número de acidentes a partir dos anos de 1999 a 2010 foram registados. Alguns segmentos destes trechos não foram incluídos na amostra estudada, já que apresentam uma ou mais características que

não se encaixam no objetivo do presente estudo. Estas características são as seguintes: (i) mais de duas faixas, (ii) inseridos em áreas urbanas, e (iii) conter interseções ou influência de interseções (com estradas de acesso a cidades ou com alternativas para o sistema de via expressa nacional). Devido a estes critérios, apenas 88 segmentos de 200 m de comprimento estão presentes na base de dados inicial (mais desagregada), como mostrado na Tab. 3.

Tab. 3. Segmentos rodoviários de 200 m considerados no desenvolvimento de MPA's.

Estrada Nacional	Trecho	Comprimento Total	Comprimento estudado ^(a)	Nº de segmentos influenciados pela interseções ^(b)	Nº de segmentos selecionados (200m)
NR - 14	Braga-Famalicão	22,20	17,60	75	13
	Braga-Guimarães	18,00	17,60	66	22
	Braga-Vila Verde	8,80	8,80	39	5
NR - 101	Guimarães-Felgueiras	20,40	17,80	61	28
	Famalicão-Guimarães	19,20	19,20	81	15
NR - 206	Guimarães-Fafe	6,40	6,40	27	5
	Total	95,00	89,40	349	88

^(a) Considera somente extensões de duas faixas não localizadas em áreas urbanas

^(b) Segmentos de 200 metros de comprimento com presença ou influência de interseções

Características geométricas

Para o objetivo deste estudo, as seguintes características geométricas de cada segmento foram consideradas:

- Largura da faixa (L)
- Largura média da berma (B)
- Desobstrução lateral (DL)
- Proporção do comprimento da reta no trecho (PCR)
- Sinuosidade em planta (SH): $SH = \frac{\sum(|\Omega_i|)}{CS}$, onde Ω_i é a curvatura do alinhamento da estrada para curva horizontal i (em graus) e CS é o comprimento do segmento considerado;
- Proporção do comprimento da trainel no trecho (PCT)
- Sinuosidade em perfil (SV): $SV = \frac{\sum(|\Delta_i|)}{CS}$, onde Δ_i é a diferença algébrica em graus observada na curva i e CS é o comprimento do segmento considerado;
- Densidade de travessias pedonais (DTP): a qual é definida como o número de travessias de peões por segmento; e
- Densidade de pontos de acesso (DPA): que é calculada como o número de acessos às propriedades particulares (e/ou para estradas secundárias sem saída) por segmento.

Os dados geométricos foram coletados no campo e algumas estatísticas relacionadas com os valores observados para os segmentos de 200 m de comprimento são apresentados na Tab. 4. É importante ressaltar que essas características foram tratadas como variáveis explicativas iniciais para a frequência de acidentes observada para cada segmento de estrada.

Tab. 4. Estatísticas descritivas das características geométricas dos segmentos.

Variável	Unidade	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo
L	m	3,66	0,18	3,05	4,23
B	m	0,74	0,56	0,10	3,45
DL	m	2,32	1,14	0,60	5,68
PCR		0,62	0,26	0,04	1,00
SH	degree/m	300,01	280,46	0,00	1491,50
PCT		0,85	0,31	0,00	1,00
SV	%/m	4,63	8,20	0,00	25,35
DTP	nº/segment	0,15	0,35	0,00	1,00
DPA	nº/segment	4,01	2,93	0,00	15,00

Dados de tráfego

Os dados de tráfego considerados para o desenvolvimento do modelo foi o tráfego médio diário anual (TMDA) por segmento rodoviário, considerando cada ano dos doze anos da base de dados de acidentes (período entre 1999 e 2010).

O TMDA foi estimado para cada ano com base nas contagens de tráfego disponibilizadas pelo órgão Estradas de Portugal – EP, as bases de dados (EP, 2000, 2003 e 2005) para os anos 2000, 2003 e 2005 e as contagens realizadas em 2010 para 31 locais cobrindo os segmentos rodoviários selecionados e os pontos de contagem do EP neste estudo. A contagem de 2010 foi então utilizada para definir o TMDA para 2010. Considerando os dados disponíveis para 2000, 2003, 2005 e 2010, o TMDA para todos os anos no período do estudo foi, então, estimado de acordo com o método proposto por Silva et al. (2006).

Dados de acidentes

Os dados de acidentes para este estudo foram fornecidos pela Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária – ANSR, e abrange o período de 1999 a 2010. A ANSR mantém uma base de dados com informações coletadas a partir do Boletim Estatístico de Acidentes de Viação – BEAV, que é preenchido no momento do acidente. Assim, a base de dados inicial, que tem 12 registos para cada um dos 88 segmentos de 200 m de comprimento é formada usando 1056 observações.

ESTUDO DA ASSOCIAÇÃO DAS VARIÁVEIS

A intenção do presente estudo é auxiliar no desenvolvimento de modelos de previsão de acidentes para rede rodoviária localizada no Norte Portugal. Assim, o estudo de associações das variáveis da base de dados dos acidentes é o marco inicial do trabalho de determinação destes modelos e é feito através de análises estatísticas.

Para além do tráfego, as características comumente utilizadas nos modelos de previsão de acidentes vários estudos referem as relações entre os acidentes e as principais características da estrada (Fitzpatrick et al., 2008; Gettman e Head, 2003; Vogt e Bared, 1998). Zegeer et al. (1992) observaram

que melhoramentos em curvas horizontais, como aumento do raio de curvatura e/ou redução do ângulo central, alargamento das vias e bermas pavimentadas, acréscimo de bermas não pavimentadas determinaram a redução da taxa de acidentes. Para o caso deste estudo exploratório trabalhar-se-á com as características gerais do traçado da via (retas e curvas) para identificar a associação entre estas características e os acidentes.

Devido ao consenso sobre a responsabilidade do comportamento do condutor na maioria dos acidentes rodoviários (Sabey e Staughton, 1975) estudar-se-á a contribuição do condutor através das variáveis idade e sexo do condutor. Estudar-se-á também a consequência do acidente para o condutor.

No Boletim Estatístico de Acidentes de Viação – BEAV a natureza (tipo) do acidente representa a informação principal para este estudo, visto que junto a esse campo identifica-se a presença ou não de vítimas no acidente. Nos modelos de previsão são considerados acidentes com danos materiais e acidentes com vítimas. No entanto, como a partir da base de dados da Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária – ANSR não é possível quantificar corretamente o número de acidentes com danos materiais, estudar-se-á as características natureza do acidente e consequências dos acidentes (severidade). Na Tab. 5 as variáveis selecionadas e os respectivos valores são apresentados detalhadamente.

Tab. 5. Variáveis e categorias selecionadas.

Variáveis	Categorias
Natureza do acidente	Atropelamentos, Colisões, Despistes
Fatores Atmosféricos	Bom tempo, Chuva e Nevoeiro
Traçado da via	Curva e Reta
Idade dos condutores	18-25; 25-35; 35-45; 45-55; 55-65 e >65
Sexo dos condutores	Masculino e Feminino
Passageiros Vítimas	Mortos, Feridos Leves e Feridos Graves
Peões Vítimas	Mortos, Feridos Leves e Feridos Graves
Condutores Vítimas	Ileso, Mortos, Feridos Leves e Feridos Graves

DETERMINAÇÃO DAS ASSOCIAÇÕES ENTRE AS VARIÁVEIS SELECIONADAS

Grande parte das variáveis estudadas na segurança rodoviária não é mensurada numericamente, mas indicam certas qualidades, atributos, de tal forma que pode alocar cada elemento numa categoria preestabelecida, resultando em dados categorizados. Destaca-se que os elementos devem estar bem definidos numa e apenas uma categoria.

Um dos grandes propósitos em pesquisas na segurança rodoviária é verificar se duas ou mais variáveis se apresentam associadas, já que esta análise auxilia na definição das variáveis de um modelo de previsão de acidentes – MPAs (Cardoso e Goldner, 2007). Assim, diz-se que duas variáveis estão associadas, se o conhecimento de uma altera a probabilidade de algum resultado da outra. No entanto, destaca-se que dizer que existe associação entre duas variáveis, X e Y, não implica, necessariamente, que X causa Y, ou que Y causa X. Apenas pode-se afirmar que o conhecimento de uma delas altera a probabilidade dos resultados da outra.

O teste de associação qui-quadrado é o teste estatístico mais antigo e um dos mais utilizados na identificação da associação de variáveis (Barbetta, 2006). Este teste permite verificar a significância da associação entre duas variáveis qualitativas.

A estatística do teste, que é designada por $\chi^2_{\text{crítico}}$, é uma espécie de medida da distância entre as frequências observadas, O, e as frequências esperadas, E, para as células da tabela de contingência, na suposição das variáveis serem independentes. Quando as variáveis são independentes, as frequências observadas tendem a ficar perto das frequências esperadas.

Logo, para um dado valor de nível de significância e para um determinado número de graus de liberdade, determina-se o valor de $\chi^2_{\text{crítico}}$ para que se possa fazer o teste. Assim, mediante a comparação entre as frequências observadas e estimadas, calcula-se a estatística do teste para os dados da tabela de contingência considerada (χ^2). As hipóteses testadas são: (i) H_0 : As variáveis são independentes e (ii) H_1 : Existe associação entre as variáveis.

No caso de se rejeitar H_0 , conclui-se que existe associação entre as variáveis e, para completar a análise, faz-se o teste de verificação do grau da associação, por meio do cálculo do coeficiente de contingência C^* . As etapas e observações necessárias à aplicação do teste de associação entre duas variáveis selecionadas para um estudo são apresentadas na **Erro! A origem da referência não foi encontrada.**

Cálculo das associações entre as variáveis

Nesta seção apresentar-se-á as hipóteses a serem testadas, a identificação da existência ou não de associações entre as variáveis e os valores dos elementos que permitem definir o grau associação entre as variáveis. As associações estudadas foram: (i) Fatores Atmosféricos x Natureza do acidente; (ii) Idade do Condutor x Natureza do acidente; (iii) Sexo do Condutor x Natureza do acidente; (iv) Consequências para os Condutores x Natureza do acidente; (v) Traçado da Via x Natureza do acidente; e (vi) Vítimas x Natureza do acidente. Para todos os casos as hipóteses testadas foram: (i) H_0 : V_1 e V_2 são variáveis independentes; e H_1 : Existe associação entre as variáveis V_1 e V_2 .

A Tab. 6 apresenta os elementos calculados para identificar se existe associação entre as variáveis estudadas e para a determinação do coeficiente de contingência (ver Tabela 13) que mede a associação. Estes resultados foram obtidos considerando um valor de $\alpha = 0,05$ (5%).

Tab. 6. Tamanho da amostra e coeficientes para identificar a associação entre as variáveis.

Variáveis	n	χ^2	$\chi^2_{\text{crítico}}$	gl
Fatores Atmosféricos x Natureza do acidente		32,16	9,49	4
Idade do Condutor x Natureza do acidente		56,59	18,31	10
Sexo do Condutor x Natureza do acidente		6,89	5,99	2
Consequências para os Condutores x Natureza do acidente		794,16	12,59	6
Traçado da Via x Natureza do acidente		287,69	5,99	2
Vítimas x Natureza do acidente		240,21	9,49	4

Na Tab. 6 também pode-se observar que para as variáveis estudadas todos os valores de χ^2 calculados são maiores do que os $\chi^2_{\text{crítico}}$ e desta forma, rejeita-se H_0 e conclui-se que há associação entre as variáveis. Visto que existe associação entre todos pares de variáveis testadas, calcula-se o grau associação entre essas variáveis, o que é apresentado na Tab. 7.

Tab. 7. Informações da associação entre as variáveis e do grau de associação.

Variáveis	Há associação?	C*	Grau de associação
Fatores Atmosféricos x Natureza do acidente	Sim	0,1048	Fraca
Idade do Condutor x Natureza do acidente	Sim	0,1029	Fraca
Sexo do Condutor x Natureza do acidente	Sim	0,0416	Fraca
Consequências para os Condutores x Natureza do acidente	Sim	0,3725	Moderada
Traçado da Via x Natureza do acidente	Sim	0,3520	Moderada
Vítimas x Natureza do acidente	Sim	0,2259	Fraca

Análise dos resultados

Como pode ser observado na Tab. 7 existe associação entre os fatores atmosféricos e a natureza do acidente, porém essa associação é fraca. Assim, pode-se verificar que para os três tipos de acidentes considerados, as ocorrências predominam em bom tempo, em torno de 70%.

Também há associação entre a idade dos condutores envolvidos nos acidentes e a natureza destes acidentes de acordo com a Tab. 7. Esta associação, assim como a anterior analisada, também é fraca. Desta forma, verifica-se que os condutores com idade entre 25 e 35 anos estão envolvidos em cerca de 28% dos atropelamentos e colisões, enquanto a faixa etária predominante nos despistes é 18 a 25 anos (cerca de 31%).

Quanto ao sexo do condutor e a natureza do acidente, que também apresentou associação do tipo fraca de acordo com a Tab. 7, destaca-se que os condutores do sexo masculino são mais envolvidos em atropelamentos e colisões, cerca de 81%, do que os do sexo feminino, na faixa de 19%. No caso dos despistes, embora haja predominância dos condutores do sexo masculino, essa participação é de 77% contra 23% da participação feminina. Ou seja, comparativamente ao condutor masculino, o condutor do sexo feminino envolve-se mais em despistes do que em atropelamentos e colisões.

As consequências dos acidentes para os condutores e a natureza do acidente estão associadas de forma moderada (ver Tab. 7). De acordo com a base dados há mais condutores ilesos entre os envolvidos em atropelamentos e colisões dos que entre os envolvidos em despistes, visto que para os atropelamentos, colisões e despistes, as percentagens são de: 90,63%, 53,61% e 15,97%, respectivamente.

As variáveis traçado da via e natureza do acidente estão associadas de uma maneira moderada, conforme Tab. 7. As taxas de acidentes obtidas são de 70,87% para as retas e 29,13% para curvas. Destaca-se que para os tipos de acidentes colisões e atropelamentos a maior incidência ocorre nas retas enquanto que a maior percentagem dos despistes se dá em curvas.

A associação do tipo fraca foi obtida para as variáveis vítimas e a natureza do acidente (Tab. 7). A taxa de mortalidade encontrada de 6,62% nos atropelamentos, é bem superior aos valores para colisões (1,18%) e despistes (3,78%). No caso dos feridos graves, as percentagens observadas foram de: 18,00%, 5,32% e 7,39 para os atropelamentos, colisões e despistes, respectivamente.

DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE PREVISÃO DE ACIDENTES

O desenvolvimento de MPA baseia-se na forma aleatória, não-negativos, discretos, e altamente disperso ao longo de dados. Além disso, em alguns casos, os dados disponíveis podem apresentar

correlações temporais ou espaciais, que impõem específicas considerações estatísticas para o desenvolvimento do modelo (Wang e Abdel-Aty, 2006). Uma análise exaustiva dos dados e as questões metodológicas sobre o desenvolvimento de abordagens analíticas para estudar os fatores relacionados aos acidentes de trânsito podem ser encontradas no trabalho de Lord e Mannering (2010). Além disso, algumas dificuldades de modelagem impostas pelas bases de dados com vários valores de zero acidentes tem causado a utilização de diferentes abordagens de modelação estatística para o desenvolvimento de MPA, que não são fáceis para justificar a partir de uma perspectiva da engenharia de tráfego (Lord et al., 2005; Lord et al., 2007).

Os dados de frequência de acidentes apresentam correlação temporal quando as mesmas instalações rodoviárias (segmentos ou interseções) são observadas ao longo do tempo. Neste caso, cada objeto de análise consiste de um grupo e as observações repetidas para diferentes anos são os elementos do grupo e os dados longitudinais formados pelos acidentes (dados do painel). Os grupos são independentes um do outro.

Ao considerar a estimativa de acidentes para uma dada instalação rodoviária (segmento ou interseção), representada por Y_{mt} , ao longo do período de tempo t , é considerada a seguinte equação:

$$E(y_{mt}) = \alpha_t \left\{ \left[\prod_i (a_{i,mt})^{\gamma_i} \right] e^{\sum_j \beta_j x_{j,mt}} \right\} \quad (1)$$

onde: $E(Y_{mt})$ = número esperado de acidentes para o elemento m no período de tempo t ;

$a_{i,mt}$, $x_{j,mt}$ = variáveis explicativas (i e j) observadas no elemento m no tempo t ;

α_t = parâmetro do modelo relacionado com o período de tempo t , e

γ_i , β_j = parâmetros do modelo constante para todo t .

Quando os dados dentro dos grupos não são correlacionados, o procedimento de modelo linear generalizado – MLG básico pode ser aplicado para modelos de efeitos fixos e aleatórios, considerando a inclusão de variáveis *dummy* para o tempo (ou espaço) no modelo. Para o caso de dados longitudinais, os procedimentos para estimar os parâmetros são derivados a partir do procedimento MLG. Para saídas não-gaussianas, os procedimentos podem ser separados em um modelo de família marginal, que são as equações de estimação generalizadas – EEG (Vangeneugden et al., 2011).

O procedimento EEG foi desenvolvido por Liang e Zeger (1986) como uma extensão do MLG para a análise de dados longitudinais, quando o foco principal da análise é a dependência da resposta do modelo para as variáveis explicativas. O procedimento EEG pode ser aplicado para as variáveis de resposta tanto gaussianas como não-gaussianas e é um método geral de análise de dados em agrupamento, onde são verdadeiras (Halekoh et al., 2006): (i) observações dentro de um agrupamento podem ser correlacionadas; (ii) observações em grupos separados são independentes; (iii) uma transformação monótona da expectativa está linearmente relacionada com as variáveis explicativas, e (iv) a variância é uma função de probabilidade.

Quanto à correlação entre as observações em um determinado grupo, as EEG permitem diferentes opções, incluindo a condição de não correlação. Wang e Abdel-Aty (2006) apresentaram uma aplicação de EEG para dados agrupados longitudinalmente e espacialmente e analisaram o impacto das diferentes opções para modelar a correlação temporal e espacial dentro dos grupos. Eles mostraram que, para a escolha não correlação (observações independentes) os valores dos parâmetros

são iguais aos produzidos pelo MLG, mas os erros padrão são diferentes, conforme o esperado. Eles também mostraram que as considerações de diferentes correlações produzem diferentes conjuntos de valores dos parâmetros e dos diferentes valores distintos das medidas de qualidade do ajuste para os modelos alternativos correspondentes.

Assim, para o presente trabalho o modelo de previsão de acidentes – MPA para segmentos rodoviários inseridos em estradas de faixas de sentidos opostos foi desenvolvido utilizando o procedimento EEG. No caso dos modelos para o número total de acidentes com 12 anos (não existem dados longitudinais), o modelo foi desenvolvido utilizando a base do procedimento MLG.

A verificação da presença e do tipo da estrutura de correlação dos dados longitudinais de acidentes de tráfego foi realizada testando as seguintes estruturas de correlação no procedimento EEG: independente, permutável e autoregressiva. Estas estruturas permitem a especificação da correlação entre o número de acidentes medidos em um dado segmento de estrada por diferentes períodos de tempo. As estruturas de correlação foram propostas por Liang e Zeger (1986) e são bem detalhadas no trabalho de Wang e Abdel-Aty (2006).

Formulação do modelo

Dado o objetivo deste estudo, a análise considera apenas o modelo de efeitos aleatórios, conforme definido por Lord e Mannering (2010). Portanto, a expressão geral de todos os modelos testados é dada por:

$$E(y_{mt}) = \alpha \left\{ \left[\text{Volume}_{mt} \right]^\gamma e^{\sum_j \beta_j x_{j,mt}} \right\} \quad (2)$$

a partir da qual a versão MLG é derivada:

$$\ln[E(y_{mt})] = \ln[\alpha] + \gamma \times \ln[\text{Volume}_{mt}] + \sum_j \beta_j x_{j,mt} \quad (3)$$

onde: $E(y_{mt})$ = número esperado de acidentes para o segmento m no período de tempo t ;
 Volume_{mt} = TMDA observado no segmento m no período de tempo t ;
 $x_{j,mt}$ = valor da variável explicativa i observada no segmento m no período de tempo t ; e
 α, γ, β_i = parâmetros do modelo a serem estimados.

No processo de modelação seguiu-se uma eliminação backward partindo do TMDA e todas as variáveis selecionadas (apresentada na Tab. 4), testando as variáveis uma a uma para significância estatística e excluindo a menos significativas. O modelo final para cada combinação de comprimento do segmento e o período de tempo observado, que considerou as três estruturas de correlação prevista pelo procedimento EEG, apresenta apenas as variáveis explicativas que são estatisticamente significativas ao nível de significância de 5%.

A identificação dos fatores, que afetam a frequência de acidentes definida pelas combinações de tempo e espaço, baseou-se no modelo que apresentou melhor ajuste aos dados.

O melhor modelo global foi selecionado com o CURE plot, porque a estatística QIC é relevante apenas para a avaliação da estrutura de correlação. Outra consideração importante para a seleção do

modelo foi a análise do sinal dos parâmetros do modelo que precisam ser compatíveis com a expectativa do ponto de vista da engenharia de tráfego.

Avaliação do modelo

Dois elementos foram considerados para a análise da qualidade do ajuste para cada MPA gerado: o teste dos resíduos acumulados (CURE plot) e o critério informação de Akaike (AIC) no EEG, que é chamado de critério de informação quase-verossimilhança (QIC).

O CURE plot considera a diferença entre o número de acidentes observados e previstos (o residual) como o elemento de base para julgar a ajuste MPA (Hauer, 2004).

O CURE plot permite o exame dos resíduos acumulados considerando a variável de interesse, que é o $Volume_{mt}$ (TMDA observado no segmento m no tempo t) para o presente estudo. Para este exame, os resíduos N ($N = n \times K$) são inicialmente classificados em ordem crescente da variável de interesse. Eles são, então, numerados de 1, 2, ..., z , ..., N . O resíduo acumulado para cada z é calculado como a soma dos resíduos de 1 a z . Um bom ajuste significa que os resíduos acumulados no CURE plot oscilam em torno do valor zero.

Além disso, o CURE plot apresenta duas curvas adicionais formados por limites aceitáveis para os resíduos acumulados, que são obtidos da seguinte forma:

- a) Calcula-se o quadrado do resíduo para cada um dos resíduos ordenados (N);
- b) Calcula-se $\hat{\sigma}^2(z)$, como a soma destes resíduos quadrados de 1 a z ;
- c) Calcule

$$\sigma^*(z) = \hat{\sigma}(z) \sqrt{1 - \frac{\hat{\sigma}^2(z)}{\hat{\sigma}^2(N)}}; e$$

(4)

- d) Adiciona-se $\pm 2\sigma^*(z)$ aos limites no CURE plot.

Pan (2001) propôs uma modificação para o AIC no procedimento EEG. A modificação foi desenvolvida para resolver um problema de seleção do modelo no EEG sobre a seleção do tipo de correlação entre as observações em um determinado grupo (trabalhando a estrutura de correlação). A modificação consiste em utilizar a quasi-verossimilhança construída a partir das equações de estimação (QIC), utilizando o modelo de independência de trabalho e qualquer estrutura de correlação geral de trabalho no EEG. A estrutura de correlação para ser adotada é a estrutura que produz o menor QIC.

Análises dos modelos desenvolvidos

Os principais resultados dos modelos obtidos no estudo dos segmentos de 200 m de comprimento são apresentados na Tab. 8. Pode-se observar que de acordo com o parâmetro QIC, a estrutura de correlação que melhor se adapta aos dados longitudinais considerados é a correlação permutável, segundo a qual as correlações entre quaisquer duas observações dentro de um grupo são constantes. Ou seja, a correlação independência, que permite que os dados longitudinais sejam tratados como registos independentes com o auxílio do procedimento MLG básico, não é adequada para a base de dados corrente.

Outra conclusão importante é que, como esperado, um pequeno número de observações (registros) considerado para a calibração do modelo pode evitar a geração de um MPA aceitável. Para o caso dos segmentos de 200 m de comprimento, quando todas as observações anuais são agrupadas (12 anos), o volume de tráfego não é uma variável explicativa, que é contra intuitivo do ponto de vista da engenharia de tráfego. Os resultados mostram, portanto, que os modelos obtidos para tamanhos de amostras iguais ou inferiores a 128 observações apresentam problemas para identificar adequadamente os principais fatores que contribuem para as frequências de acidentes observadas no campo.

Tab. 8. Modelos estimados para segmentos rodoviários de 200 m de comprimento (continua).

Período de tempo	Parâmetros	Estrutura de Correlação					
		Independente		Permutável		Autoregressiva	
		Coef.	D. P. (p-valor)	Coef.	D. P. (p-valor)	Coef.	D. P. (p-valor)
1 ano	Interceto	-9,0553	23,862 (0,0001)	-10,4859	2,3897 ($<$,0001)	-9,1073	-9,1073 (0,0001)
	ln (TMDA)	0,4700	0,1644 (0,0042)	0,5840	0,1584 (0,0002)	0,4735	0,4735 (0,0041)
	DPA	0,0581	0,0205 (0,0046)	0,0599	0,0204 (0,0034)	0,0580	0,0205 (0,0046)
	L	0,8829	0,3665 (0,0160)	0,9738	0,3798 (0,0104)	0,8881	0,3662 (0,0153)
	SV	0,0251	0,0117 (0,0324)	0,0246	0,0117 (0,0366)	0,0251	0,0118 (0,0338)
	QIC	1541,9739		1513,4065		1542,0290	
Número de observações na base de dados = 1056							
2 anos	Interceto	-8,3380	2,3546 (0,0004)	-9,9027	2,3628 ($<$,0001)	-9,0360	2,3536 (0,0001)
	ln (TMDA)	0,4706	0,1613 (0,0035)	0,5947	0,1548 (0,0001)	0,5088	0,1582 (0,0013)
	DPA	0,0579	0,0207 (0,0051)	0,0592	0,0206 (0,0040)	0,0583	0,0209 (0,0053)
	L	0,8749	0,3667 (0,0170)	0,9768	0,3828 (0,0107)	0,9654	0,3765 (0,0104)
	SV	0,0251	0,0119 (0,0349)	0,0246	0,0120 (0,0402)	0,0257	0,0119 (0,0301)
	QIC	984,9420		968,6803		985,4890	
Número de observações na base de dados = 528							
3 anos	Interceto	-8,4936	2,4088 (0,0004)	-9,2926	2,4229 (0,0001)	-9,2169	2,4494 (0,0002)
	ln (TMDA)	0,5008	0,1515 (0,0010)	0,5634	0,1511 (0,0002)	0,5403	0,1511 (0,0003)
	DPA	0,0635	0,0247 (0,0101)	0,0638	0,0245 (0,0093)	0,0638	0,0251 (0,0109)
	L	0,8361	0,4243 (0,0488)	0,8899	0,4279 (0,0376)	0,9291	0,4432 (0,0360)
	SV	0,0237	0,0112 (0,0349)	0,0235	0,0112 (0,0355)	0,0249	0,0112 (0,0266)
	QIC	664,0794		660,6424		666,3379	
Número de observações na base de dados = 352							
4 anos	Interceto	-7,0920	2,3245 (0,0023)	-8,1336	2,3386 (0,0005)	-7,7663	2,3397 (0,0009)
	ln (TMDA)	0,4400	0,1594 (0,0058)	0,5188	0,1558 (0,0009)	0,4811	0,1550 (0,0019)
	DPA	0,0571	0,0213 (0,0072)	0,0574	0,0213 (0,0070)	0,0575	0,0218 (0,0082)
	L	0,8058	0,3644 (0,0270)	0,8841	0,3759 (0,0187)	0,8820	0,3775 (0,0195)
	SV	0,0248	0,0122 (0,0418)	0,0247	0,0124 (0,0453)	0,0250	0,0122 (0,0410)
	QIC	390,1382		385,4662		388,6758	
Número de observações na base de dados = 264							

Período de tempo	Parâmetros	Estrutura de Correlação					
		Independente		Permutável		Autoregressiva	
		Coef.	D. P. (<i>p</i> -valor)	Coef.	D. P. (<i>p</i> -valor)	Coef.	D. P. (<i>p</i> -valor)
6 anos	Interceto	-6,8405	2,3018 (0,0030)	-8,0842	2,2663 (0,0004)	-8,0842	2,2663 (0,0004)
	ln (TMDA)	0,4525	0,1561 (0,0037)	0,5452	0,1483 (0,0002)	0,5452	0,1483 (0,0002)
	DPA	0,0571	0,0215 (0,0079)	0,0575	0,0215 (0,0075)	0,0575	0,0215 (0,0075)
	L	0,8147	0,3658 (0,0259)	0,9114	0,3763 (0,0154)	0,9114	0,3763 (0,0154)
	SV	0,0246	0,0122 (0,0443)	0,0248	0,0125 (0,0483)	0,0248	0,0125 (0,0483)
	QIC	38,7658		38,5460		38,5460	
Número de observações na base de dados = 176							
12 anos (MLG)	Interceto	1,1707	0,1466 (<i><</i> ,0001)				
	SV	0,0221	0,0092 (0,0160)				
	DPA	0,0623	0,0255 (0,0146)				
	AIC	455,8427					
Número de observações na base de dados = 88							

Considerando apenas os modelos aceitáveis do ponto de vista da engenharia de tráfego e da estatística, que são aqueles gerados a partir da base de dados com mais de 128 observações, é possível verificar que dentre as variáveis estudadas, os principais fatores que contribuem para a frequência de acidentes são o volume de tráfego (TMDA), a largura das faixas, a sinuosidade vertical e a densidade de pontos de acesso. Todas estas variáveis têm um impacto positivo sobre a variável dependente (coeficientes com sinal positivo). Um aspecto importante salientar é que a largura das faixas na base de dados varia de 3,05 m de 4,23 m. O que os resultados mostram, por conseguinte, é faixas maiores podem ter um efeito negativo sobre a segurança de tráfego, provavelmente devido a redução na capacidade da faixa de ajudar manter os veículos nas trajetórias semelhantes. Como avaliação final dos modelos considerados aceitáveis, o CURE plot para cada caso foi desenvolvido (Figura 1).

Na Figura 1, é possível observar que para os modelos de dados de 3 anos, 4 anos e 6 anos de acidentes, o CURE plot oscila em torno de 0 e não cruza os limites superiores e inferiores, Portanto, os modelos podem ser considerados aceitáveis. No entanto, os resíduos acumulados para os modelos de 4 anos e 6 anos apresentam pontos muito perto do limite superior, o que não acontece no modelo de 3 anos. Além disso, para aplicações práticas, um modelo que pode estimar o número de acidentes por curto período de tempo parece ser mais conveniente. Devido a isso, o modelo de 3 anos pode ser considerado como o melhor modelo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo mostra empiricamente que as variáveis estudadas (fatores atmosféricos, traçado da via, habilitação de condução, passageiros vítimas, peões vítimas e condutores vítimas) estão todas associadas com a natureza do acidente. No entanto, a maioria das associações é fraca. Na análise, tomou-se por referencial teórico e metodológico o teste de associação qui-quadrado.

Dentre os principais resultados obtidos destaca-se a verificação da maior incidência de mortos e feridos graves nos atropelamentos e despistes quando comparado às colisões. Um outro ponto a

destacar diz respeito à maior ocorrência de atropelamentos e colisões em trechos retos, enquanto que os deslizes predominam nos trechos curvos.

Alguns dos resultados obtidos, como por exemplo, os relacionados com fatores atmosféricos, idade e sexo do condutor devem ser vistos com ressalvas, já que não é conhecido o número de pessoas com carta de condução em cada faixa etária, nem o número de condutores do sexo masculino que utilizam os trechos analisados, Em relação aos fatores atmosféricos não foram obtidos dados para o período estudado (1999 a 2008).

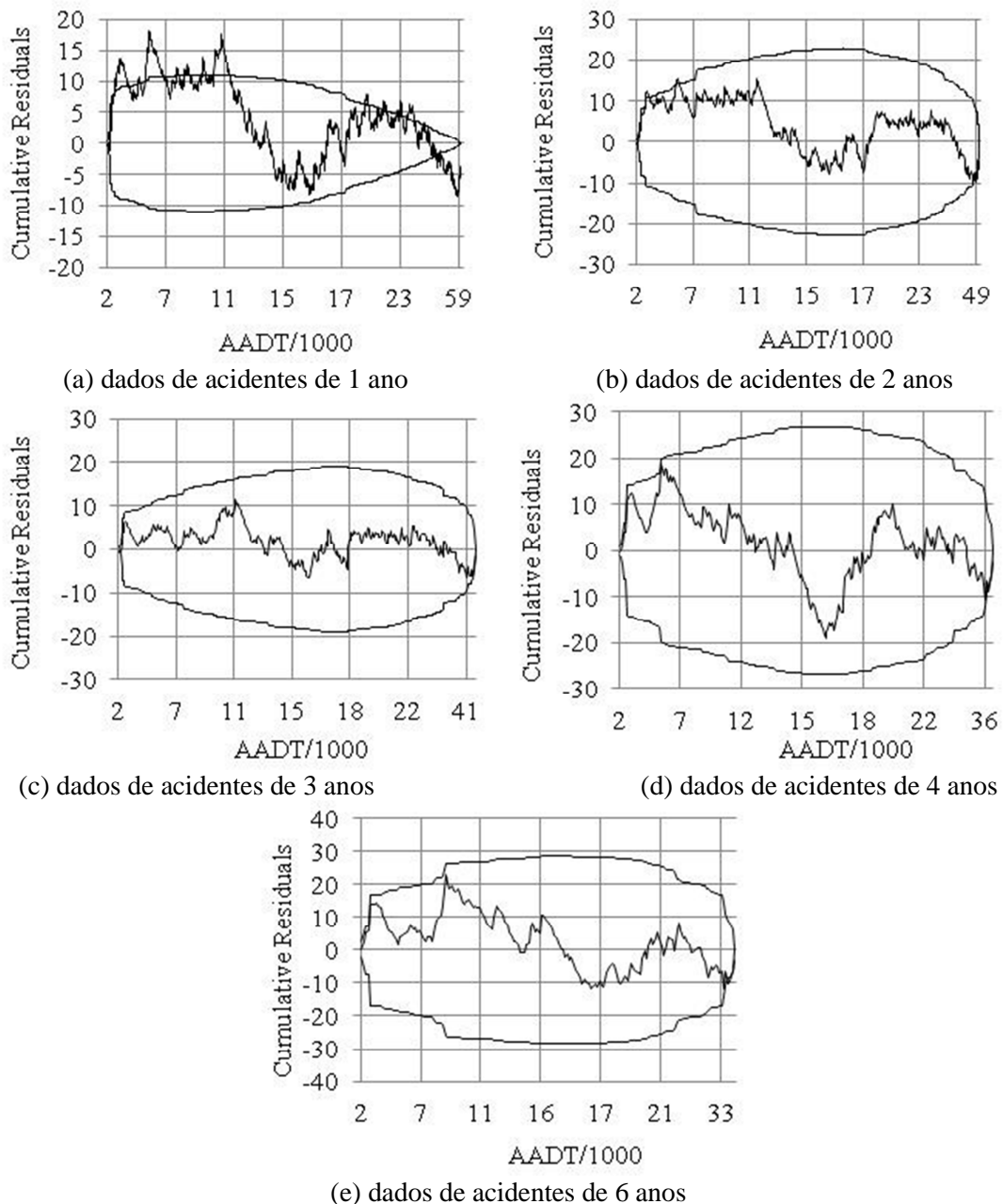


Fig. 1. CURE plot para modelos desenvolvidos de segmentos (200 m).

Cabe destacar que os resultados obtidos, sobretudo com relação ao impacto da geometria sobre a ocorrência dos diferentes tipos de acidentes, serão utilizados no desenvolvimento futuro de um modelo de previsão de acidentes para as rodovias do Norte de Portugal.

O objetivo do estudo também foi a identificação dos principais fatores que contribuem para ocorrência dos acidentes rodoviários para os segmentos de 200 m de comprimento das rodovias de suas faixas de sentidos opostos localizados na região Norte de Portugal. A importância deste trabalho é contribuir para a promoção da segurança no sistema nacional rodoviário do norte Português, que atende muitas cidades e zonas industriais.

A base de dados inicial considerada para este estudo foi formada pela frequência de acidentes, o tráfego médio diário anual (TMDA) e as características geométricas de 88 segmentos de 200 m de comprimento nos anos de 1999 a 2010. Esta base de dados contém 1056 registos de dados, dos quais 740 têm zero acidentes anuais. Os dados sobre acidentes foram fornecidos pela Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária – ANSR, enquanto os dados de volume foram estimados com base em contagens de tráfego disponibilizadas pelo órgão Estradas Portuguesas – EP. As características geométricas de cada segmento rodoviário foram recolhidas diretamente no campo ou calculado com base em dados de campo colectados.

O procedimento de equações de estimação generalizadas – EEG foi selecionado para trabalhar com os dados longitudinais disponíveis (muitas observações para cada segmento). Para reduzir o número de observações zero acidentes, diferentes bases de dados foram obtidas a partir da base de dados inicial tomando em consideração as variações no tempo dos dados, tal como sugerido por Lord et al. (2005). Em termos de tempo, cinco opções para agregar os dados foram consideradas, todas as quais foram destinadas a incluir todos os dados de 12 anos disponíveis. Estas opções incluem grupos de 2 anos, 3 anos, 4 anos, de 6 anos e 12 anos. Portanto, incluindo os dados de 1 ano do acidente, 6 diferentes bases de dados foram analisadas. As bases de dados de um único grupo foram tratadas utilizando o procedimento MLG básico.

Para as bases de dados estudadas, os resultados mostraram que para tamanhos de amostra superiores a 128 observações (registros de dados), os modelos foram capazes de capturar os mesmos fatores significativos que contribuem para as frequências de acidentes observados. Esses fatores foram o volume de tráfego (TMDA), largura da faixa, sinuosidade vertical e densidade de pontos de acesso. Como estes fatores resultam em coeficientes positivos nos modelos, que são aceitáveis, quando elas aumentam, é razoável esperar que a frequência de acidentes também aumente.

Outro ponto importante foi a aplicação do procedimento EEG, o que mostrou, para os segmentos de 200 m de comprimento, que os dados de tráfego observados (duas ou mais) são efetivamente correlacionados, a estrutura de correlação correspondente foi a permutável. Destaca-se o tipo de correlação entre as observações na base de dados deve ser investigada antes do desenvolvimento do MPA quando cada localização (segmento ou interseção) é observada ao longo de períodos de tempo diferentes.

Finalmente, o estudo mostra que a base de dados com segmentos rodoviários de 200 m de comprimento e com os dados de acidentes agrupados por um período de 3 anos produz um modelo de previsão de acidentes aceitável de acordo com a análise do CURE plot desenvolvido para as diferentes combinações estudadas.

REFERÊNCIAS

- Autoridade Nacional de Segurança Rodoviária – ANSR, (2009) *Sinistralidade Rodoviária*. Observatório de Segurança Rodoviária, Lisboa.
- Barbetta, P. A. (2006) *Estatística aplicada às ciências sociais*. Ed.6. vol.2. Florianópolis: UFSC.
- Cardoso, G.; Goldner, L. G. (2007) *Desenvolvimento e aplicação de modelos para previsão de acidentes de trânsito*. Transportes, v. XV, n. 2, p. 43-51.
- EP – Estradas de Portugal. 2000. Relatório de Volume de Tráfego na Estradas Nacionais da Região Norte de Portugal. Material não publicado.
- EP – Estradas de Portugal. 2003. Relatório de Volume de Tráfego na Estradas Nacionais da Região Norte de Portugal. Material não publicado.
- EP – Estradas de Portugal. 2005. Relatório de Volume de Tráfego na Estradas Nacionais da Região Norte de Portugal. Material não publicado.
- Fitzpatrick, K.; Lord, D.; Park, B., 2008. Accident modification factors for medians on freeways and multilane rural highways in Texas. Journal of the Transportation Research Board. Washington. Vol. 2083, pp 62-71.
- Gettman D.; Head L., (2003) *Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models*. F.Report, FHWA-RD-03-050, FHA, Washington, D.C.
- Halekoh, U., Højsgaard, S., Yan, J., 2006. The R Package geepack for Generalized Estimating Equations. Journal of Statistical Software, Volume 15, Issue 2, pp. 1-11.
- Harwood, D.W., Council, F.M., Hauer, E., Hughes, W. E., Vogt, A., 2000. Prediction of expected safety performance of rural two-lane highways. Publication No. FHWA-RD-99-207. FHWA – Federal Highway Administration.
- Hauer, E. 2004. Statistical Road Safety Modeling. Transportation Research Record No. 1897, pp. 81-87.
- Lord, D., Mannering, F., 2010. The statistical analysis of crash-frequency data: A review and assessment of methodological alternatives. Transportation Research Part A, 44, pp. 291-305.
- Lord, D., Washington, S.P., Ivan, J.N., 2005. Poisson, Poisson-gamma and zero-inflated regression models of motor vehicle crashes: balancing statistical fit and theory. Accident Analysis and Prevention 37, pp. 35-46.
- Lord, D., Washington, S.P., Ivan, J.N., 2007. Further notes on the application of zero-inflated models in highway safety. Accident Analysis and Prevention 39, pp. 53-57.
- Pan, W., 2001. Akaike's Information Criterion in Generalized Estimating Equations. Biometrics 57, pp. 120-125.
- Sabey, B. E.; Sraughton, G. C. (1975) *Interacting roles and road environment, Vehicle and road user in accidents*. In *Oliver Carsten in Human Factors in Road Traffic II*, U, Braga 9-11 Abril. 1997.
- Silva, A. R.; Araújo, C. E. F.; Rocha, C. H., 2006. Estimating transit passenger demand in the axis of opportunities Taguatinga-Ceilandia (in Portuguese). In: Proceedings of the 20th Annual Meeting of the Brazilian Association for Transportation Research and Teaching. ANPET, Brasília. v. 1. pp. 467-478.
- Thomas, P., Morris, A., Otte, D. & Breen, J., 2003. Real-world Accident Data-Coordinated Methodologies for Data Collection to Improve Vehicle and Road Safety. In: 18th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles, Japan, May 19-22.

Vangeneugden, T., Molenberghs, G., Verbeke, G., Demétrio, C.G.B., 2011. Marginal correlation from an extended random-effects model for repeated and overdispersed counts. *Journal of Applied Statistics*, Vol. 38, No.2, pp. 215-232.

Vogt A.; Bared J. G., (1998) *Accident Models For Two-Lane Rural Roads: Segments And Intersections*. FHWA-RD-98-133, FHA, Washington, D.C.

Wang, X., Abdel-Aty, M., 2008. Temporal and spatial analysis of rear-end crashes at signalized intersections. *Accident Analysis and Prevention* 38, pp. 1137-1150.

WHO - World Health Organization, 2009. *Global Status Report on road safety: time for action*. Geneva, World Health Organization.

Zegeer, C. V.; Stewart, J. R.; Council, F. M.; Reinfurt, D. W.; Hamilton, E., 1992. Safety effects of geometric improvements on horizontal curves. *Transportation Research Record*, 1356, p

UTILIZAÇÃO DA NANOTECNOLOGIA NA PREPARAÇÃO DE MISTURAS ASFÁLTICAS COM CAPACIDADE FOTOCATALÍTICA

#Joaquim Carneiro¹
Filipa Fernandes¹,
Vasco Teixeira¹
José Heriberto Nascimento^{1,2}
Elisabete Freitas²
Paulo Pereira²

¹Departamento de Física, Grupo de Revestimentos Funcionais

²Departamento de Engenharia Civil, Centro do Território, Ambiente e Construção
Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

#E-mail: carneiro@fisica.uminho.pt

RESUMO

Este artigo centra-se especificamente na utilização de nanomateriais (na forma de nanopartículas) para o desenvolvimento de “novas” misturas asfálticas no âmbito da pavimentação rodoviária. Para o efeito, misturas asfálticas convencionais foram modificadas através da utilização de nanopartículas de um semiconductor inorgânico (dióxido de titânio - TiO₂) de modo a dotá-las de novas funcionalidades: capacidade fotocatalítica (aptidão para fotodegradar compostos orgânicos) e capacidade autolimpante. Estas propriedades são muito importantes no domínio da segurança rodoviária, já que conjuntamente podem promover uma acção antiderrapante, que permite a diminuição do número de acidentes de viação. Na verdade, um dos principais motivos pelo qual ocorre o fenómeno de derrapagem (especialmente devido às primeiras chuvas de Outono) resulta da presença de água combinada com óleos e gorduras adsorvidos à superfície dos pavimentos rodoviários. As nanopartículas de TiO₂ foram estruturalmente caracterizadas por difracção de Raios-X. As misturas asfálticas foram caracterizadas quimicamente por espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). A morfologia das superfícies foi avaliada por microscopia de força atómica (AFM). A capacidade fotocatalítica das misturas asfálticas modificadas foi avaliada através de quantificação do rendimento do processo de fotodegradação de uma solução aquosa de azul-de-metileno (AM) e a função autolimpante (capacidade antiderrapante) foi avaliada indirectamente através da avaliação da molhabilidade da superfície (ângulo de contacto entre uma gota de água e a superfície). Os resultados obtidos demonstram que utilização de nanopartículas de TiO₂ (aplicadas na superfície por aspersão de uma solução aquosa) permitiu desenvolver misturas asfálticas com capacidade fotocatalítica, já que o rendimento de fotodegradação foi superior a 50%.

Palavras-chave: Nanotecnologia, misturas asfálticas, capacidade fotocatalítica

INTRODUÇÃO

A Nanotecnologia é um termo normalmente utilizado para abranger a concepção, construção e utilização de estruturas com pelo menos uma dimensão medida à escala nanométrica. Comparado com as estruturas típicas de engenharia civil os dois campos operam escalas dimensionais completamente divergentes. A nanotecnologia desenvolveu-se fundamentalmente nos domínios da física e da química,

mantendo-se actualmente como as áreas do conhecimento que mais contribuem para o desenvolvimento de novos materiais com elevado potencial de aplicação tecnológica. No entanto, para que a nanotecnologia seja amplamente utilizada pela sociedade em geral, é absolutamente necessário que os conhecimentos detidos pelas ciências mais fundamentais sejam utilizados e aplicados pela engenharia de modo a materializa-los em produtos comercializáveis e úteis para os cidadãos.

Actualmente, movimentam-se no espaço Europeu cerca de 375 milhões de cidadãos, onde a principal causa dos acidentes rodoviários advém do mau estado dos pavimentos [1]. Os óleos que se vão acumulando nas estradas bem como a existência de zonas com drenagem deficiente, constituem dois dos principais factores que mais contribuem para a diminuição da aderência dos veículos ao pavimento. Neste sentido, é fundamental desenvolver novas alternativas funcionais, que permitam ultrapassar estes problemas [2].

A utilização de betão com capacidade autolimpante ocorreu pela primeira vez na Igreja Dives in Misericórdia projectada pelo Arqº Richard Meyer e inaugurada em Roma no ano de 2003. Mais recentemente, em Agosto de 2006, completou-se na cidade alemã de Fulda o primeiro projecto municipal onde se utilizaram blocos de pavimento com capacidade fotocatalítica.

No que concerne aos pavimentos asfálticos, existem poucos trabalhos de investigação referentes à incorporação de TiO₂ nas formulações betuminosas. Na verdade, os principais estudos e aplicações têm-se centrado fundamentalmente na modificação de pavimentos cimentícios que representam, apenas, cerca de 6% da rede rodoviária nacional. Por isso, justifica que seja efectuado um esforço de investigação visando a modificação de misturas betuminosas de modo a torná-las multifuncionais.

Actividade fotocatalítica

A fotocatalise heterogénea representa o processo de catálise induzida por uma reacção fotoquímica que ocorre na superfície de um material semiconductor [3]. O processo de fotocatalise inicia-se pela absorção de um fotão com energia igual ou superior ao hiato de energia do semiconductor, gerando-se pares electrão/lacuna (e^-/h^+).

Uma fracção dos pares (e^-/h^+) migram para a superfície do semiconductor e participam em reacções químicas de oxidação-redução, gerando-se radicais altamente reactivos. Na presença de oxigénio e de água (proveniente da humidade relativa do ar), os radicais hidroxilo (HO[•]) e os superóxidos (O₂⁻) reagem com os compostos orgânicos (poluentes) adsorvidos na superfície do semiconductor e decompõem-nos em dióxido de carbono e água [4-6].

O semiconductor mais estudado e utilizado no âmbito dos processos fotocatalíticos é o dióxido de titânio. A sua expressiva utilização, decorre fundamentalmente do facto de se tratar de um material que apresenta baixa toxicidade, forte poder oxidativo, elevada estabilidade química e custo moderadamente reduzido [7-9].

A Figura 1 representa esquematicamente o mecanismo de fotocatalise promovido pela utilização do dióxido de titânio [10].

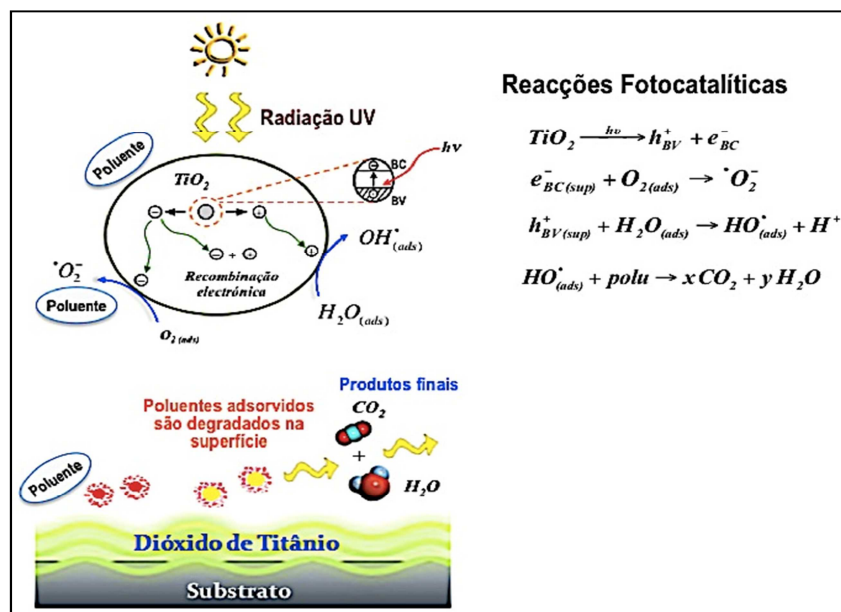


Fig. 1. Representação esquemática do mecanismo de fotocatalise induzido pelo TiO₂.

Betume

O betume provém do processo de refinação do petróleo e é fundamentalmente constituído por uma mistura complexa de hidrocarbonetos (90 a 95%) com massa molecular e estruturas químicas diferentes. A restante parte (5 a 10%) contempla a presença de heteroátomos (oxigénio, enxofre, azoto e metais diversos, como por exemplo o vanádio, níquel e ferro).

A composição química deste material pode variar devido a quatro principais factores: a origem do petróleo, o tipo de fraccionamento a que é submetido, as modificações induzidas no processo de refinação e durante o envelhecimento que decorre da sua aplicação e da sua utilização como pavimento.

O betume pode ser fraccionado em quatro tipos de compostos, que são identificados de acordo com a seguinte classificação europeia: *saturados* (alcanos e ciclo-parafinas), *aromáticos* (hidrocarbonetos mono, bi e poli-aromáticos), *resinas* (fracções constituídas por moléculas polares contendo heteroátomos como N, O ou S) e *asfaltenos* (são moléculas semelhantes às resinas, contudo possuindo maior massa molecular e núcleo poli-aromático). Esta classificação é enunciada através da utilização da sigla SARA [11-13].

Os asfaltenos (também conhecidos por formarem estruturas “*tipo abelha*”) constituem a fracção mais complexa do petróleo na medida em que são uma mistura de componentes de natureza aromática com elevado peso molecular. De acordo com Gauthier e seus colaboradores [14], os asfaltenos constituem uma mistura heterogénea complexa de moléculas altamente polidispersas no que concerne ao seu tamanho e composição química, compostas por anéis poli-aromáticos condensados, cadeias alifáticas, anéis nafténicos que contêm heteroátomos como o azoto, oxigénio e enxofre, apresentando-se na forma de ácidos carboxílicos, amidas, aminas e álcoois, e metais como o ferro, vanádio e níquel [15,16].

O betume pode ser representado pelo modelo de *Yen* [17], ou também conhecido como modelo de estruturas micelares. Este modelo, considera que o betume é uma dispersão coloidal de asfaltenos inserida num meio que é normalmente designado por maltenos (óleos saturados e óleos aromáticos). Os asfaltenos estão normalmente envolvidos por resinas através de um processo de solvatação, formando micelas (grupos polares) cuja geometria pode ser aproximadamente esférica ou cilíndrica.

MÉTODO EXPERIMENTAL

Preparação da mistura asfáltica padrão

A preparação das amostras representativas da mistura asfáltica padrão foi efectuada de acordo com uma das formulações mais utilizadas pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho.

As formulações betuminosas padrão são constituídas por diferentes tipos de materiais onde os mais correntes são a brita (grãos aproximadamente esféricos com diferentes dimensões), filler comercial e betume comercial (Styrelf® 13/60) modificado pela adição de um polímero de estireno-butadieno-estireno (SBS).

Preparação de misturas asfálticas modificadas pela adição de nanopartículas de TiO₂

A modificação da mistura asfáltica padrão foi efectuada através de execução de dois métodos diferentes. No primeiro método, as nanopartículas de TiO₂ foram usadas como um aditivo da mistura asfáltica padrão. Neste método, as partículas do material semiconductor foram misturadas conjuntamente com todos os materiais utilizados no fabrico da mistura asfáltica padrão, utilizando-se duas percentagens diferentes, designadamente 3 e 6% em peso.

No segundo método de modificação, as partículas do material semiconductor foram aplicadas através da aspersão de uma solução aquosa (pH = 8) de nanopartículas de TiO₂ sobre a superfície da amostra, utilizando-se para o efeito duas concentrações diferentes, nomeadamente de 4 e 10 g/L. Usando-se um compressor de ar atmosférico, as amostras foram aspergidas a uma distância de cerca de 20 cm durante 30 segundos e com uma velocidade aproximadamente igual a 100 ml/min. Deste modo, conseguiu-se uma taxa de recobrimento sensivelmente igual a 5 e 12,5 mg/cm² correspondendo respectivamente, às concentrações de 4 e 10 g/L. Os dois métodos de modificação estão esquematizados na Figura 2.

Técnicas de caracterização

Neste trabalho, a análise da composição química do betume Styrelf® 13/60 foi realizada através de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Esta técnica, permite efectuar a identificação dos principais grupos funcionais do betume utilizado no âmbito desta trabalho de investigação. Os espectros de FTIR foram obtidos a partir do filme de ligante asfáltico num espectrofotómetro Avatar 360 FT-IR Nicolet, ao longo de uma banda espectral de 4000 – 400 cm⁻¹.

A fim de se avaliar a influência do pH da solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ na manutenção da integridade física do betume Styrelf® 13/60, foram produzidas três amostras diferentes. A primeira refere-se à aplicação de uma camada fina de betume sobre a superfície de uma lâmina de vidro. As duas amostras restantes resultaram de modificação do betume conseguida através da aspersão de uma

solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ (concentração de 4g/L) com pH de 5,4 e 8. A topografia superficial das três diferentes amostras produzidas foi avaliada através da análise de imagens de AFM objectivando a avaliação do efeito da variação do pH na rugosidade máxima e na estrutura do betume que tipicamente é caracterizada por uma “configuração *tipo abelha*”.

Os pós de TiO₂ utilizados neste trabalho foram estruturalmente caracterizados por difracção de Raios-X (fonte de radiação CuK α) através da utilização do difractómetro Philips PW 1710. O tamanho médio das partículas de TiO₂ foi calculado através da equação de Scherrer [18].

A função autolimpante (capacidade antiderrapante) foi avaliada indirectamente através da avaliação da molhabilidade da superfície das misturas asfálticas modificadas. Para o efeito, avaliou-se o ângulo de contacto, *AC*, entre uma gota de água e a superfície das amostras, através da utilização do goniómetro “System OCA-15” que incorpora uma câmara CCD e por isso, permite registar ao longo do tempo a imagem da gota de água.

A actividade fotocatalítica das misturas asfálticas modificadas foi avaliada através da medição da variação da absorvância, *A*, de uma solução aquosa de AM (concentração inicial de 5 mg/L) em função do tempo de irradiação de luz UV (intensidade igual a 12 W/m²). Os valores máximos de absorvância da solução de AM, foram obtidos para o comprimento de onda de 665 nm através da utilização do espectrofotómetro UV/vis Shimadzu 3101 PC. A diminuição ao longo do tempo da absorvância máxima da solução, indica a decomposição do AM provocada pelo processo fotocatalítico. O rendimento ou eficiência, η , do processo de fotodegradação pode ser calculado através da seguinte equação:

$$\eta(\%) = \left(\frac{A_0 - A}{A_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

onde *A*₀ e *A* indicam, respectivamente, a absorvância máxima da solução de AM no instante *t* = 0 e *t* = *t*.

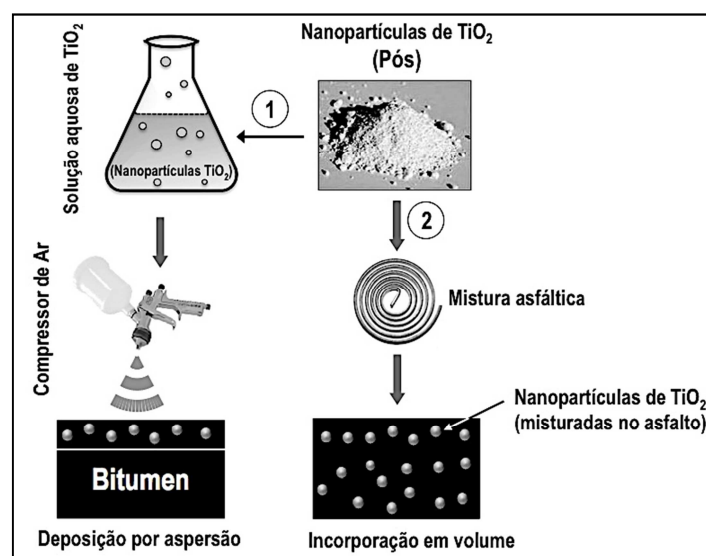


Fig. 2. Representação esquemática do método utilizado para a preparação de misturas asfálticas modificadas pela adição de nanopartículas de TiO₂.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A análise de resultados e a sua discussão são comentados nas secções seguintes.

Caracterização química (FTIR) do ligante asfáltico

A análise das ligações químicas do betume betume Styrelf® 13/60 foi efectuada através da técnica de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier. O espectro de FTIR apresentado na Figura 3 refere-se à amostra de betume aplicado sobre a superfície de uma lâmina de vidro.

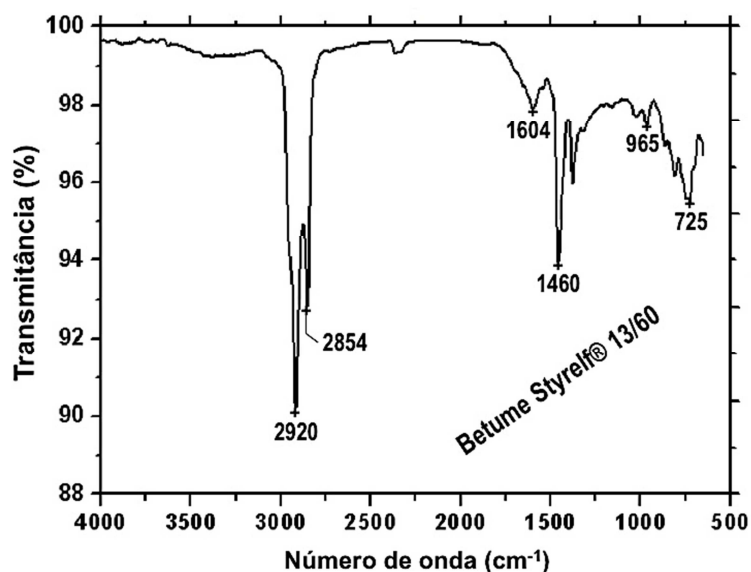


Fig. 3. Espectro de transmitância resultante da caracterização química do betume Styrelf® 13/60 utilizando espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier.

De acordo com a análise do espectro, é possível observar que as bandas mais intensas são identificadas a aproximadamente 2920 cm^{-1} e 2854 cm^{-1} e correspondem respectivamente aos modos de vibração assimétricos de alongamento C-H (CH_3 , CH_2), e simétricos de alongamento C-H (CH_2) das cadeias dos hidrocarbonetos. Por outro lado, podem também ser observados modos de vibração de flexão característicos das ligações C-H que ocorrem para energias com número de onda igual a 1460 cm^{-1} . Entretanto, o pico referente a 1604 cm^{-1} corresponde a uma ligação dupla de carbono (C=C) no anel aromático do benzeno. Os picos referentes a 965 cm^{-1} e 725 cm^{-1} podem ser respectivamente atribuídos ao estiramento das cadeias do butadieno e vibrações por flexão das ligações C-H nas cadeias do estireno.

Análise por AFM da topografia da superfície do betume Styrelf® 13/60

A morfologia topografia superficial do betume Styrelf® 13/60 é mostrada na Figura 4a. Esta imagem mostra uma matriz homogénea na qual existe uma outra fase dispersa. A fase dispersa, corresponde a uma sucessão de linhas claras e escuras, habitualmente denominadas por "abelhas" ou "estruturas tipo abelha". O seu correspondente perfil topográfico é mostrado na Figura 4b. A fase dispersa é também designada por fase Catana, a partir do Grego-cata, alto para baixo, e ana, baixo para alto.

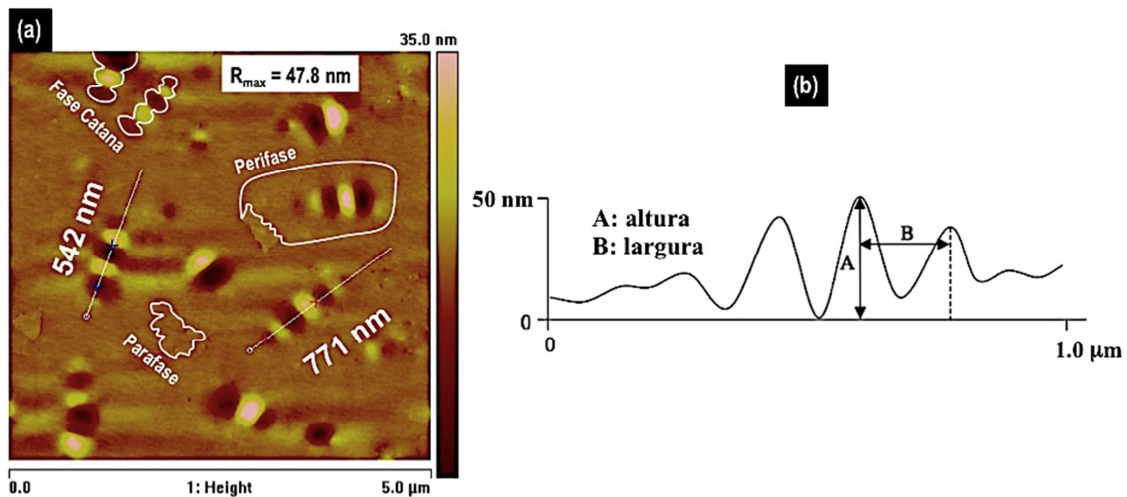


Fig. 4. Imagem de AFM do betume Styrelf® 13/60: (a) matriz homogénea na qual existe uma outras fases dispersas; (b) perfil topográfico das estruturas tipo abelha (fase catana).

De acordo com a Figura 4a as estruturas tipo abelha apresentam um tamanho médio de aproximadamente 656 nm. Por outro lado, a rugosidade máxima medida foi de 47,8nm. As imagens da Figuras 5a e 5b e referem-se à topografia da superfície do betume Styrelf® 13/60 modificado respectivamente através da aspersão de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO_2 com pH=5,4 e pH=8.

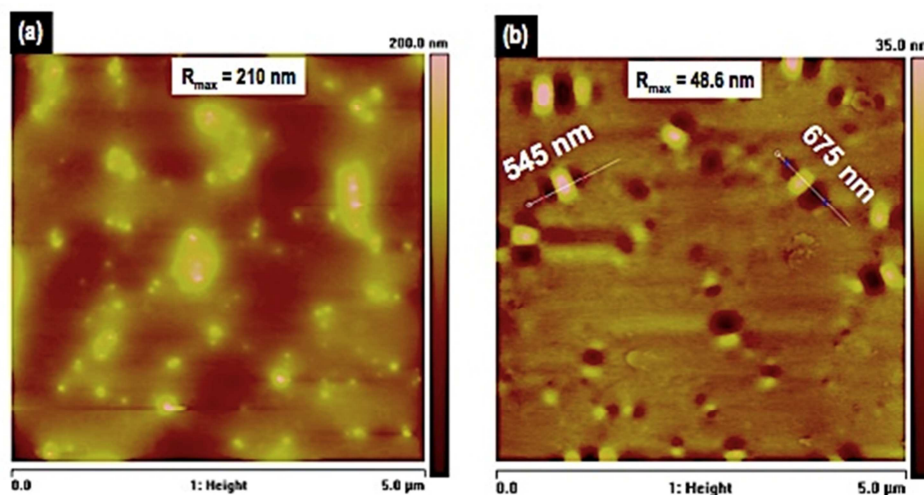


Fig. 5. Imagem de AFM do betume Styrelf® 13/60: (a) aspergida com uma solução aquosa de nanopartículas de TiO_2 com pH=5,4 ; (b) aspergida com uma solução aquosa de nanopartículas de TiO_2 com pH=8.

A análise da imagem da Figura 5a evidência claramente uma degradação do betume devido à ausência das estruturas tipo abelha. Por outro lado, observa-se também a provável existência de agregados de nanopartículas de TiO_2 com elevada dimensão à superfície do betume. Imediatamente após a aspersão desta solução, observou-se (macroscopicamente) uma pronunciada degradação física do betume (em algumas regiões da superfície observaram-se a formação de crateras evidenciando a superfície da lâmina de vidro). Esta constatação indica claramente que a utilização de uma solução com pH ácido não é viável para a produção dos substratos betuminosos modificados.

Ao contrário da situação anterior, a observação das imagens da Fig. 5b permite identificar nitidamente a manutenção das “estruturas tipo abelha” características do betume. De facto, o tamanho médio das estruturas observadas nesta amostra é da mesma ordem de grandeza (610nm) das que foram identificadas na superfície do betume não modificado. Além disso, constata-se também que a rugosidade máxima da superfície do betume modificada pela aspersão de uma solução de nanopartículas de TiO₂ com pH=8 aumentou muito ligeiramente (48,6nm) em comparação com a relativa à superfície do betume não modificado. Neste sentido, a produção de substratos betuminosos modificados pela aspersão de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ deve ser realizada através da utilização de soluções alcalinas.

Caracterização estrutural das nanopartículas de TiO₂

Os pós de TiO₂ utilizados neste trabalho foram estruturalmente caracterizados por difracção de Raios-X. O difractograma resultante desta análise pode ser observado na Figura 6.

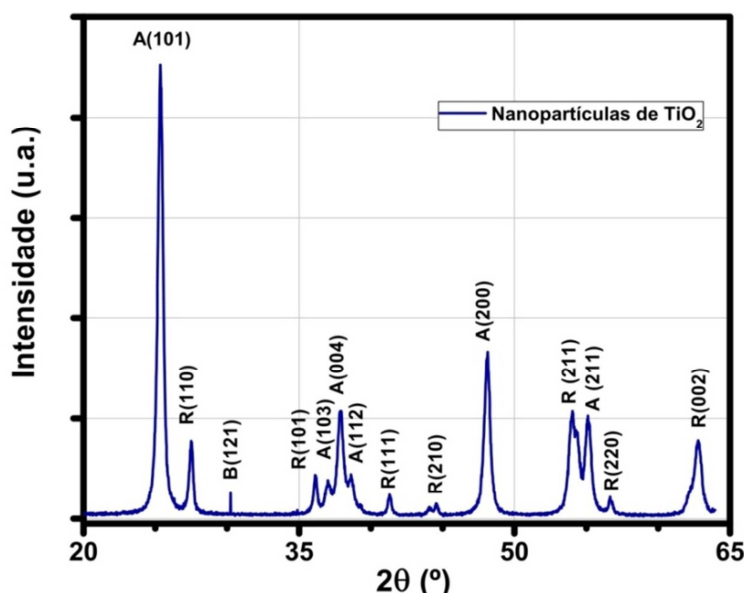


Fig. 6. Difractograma das nanopartículas de TiO₂

De acordo com a análise do difractograma é possível observar fundamentalmente a presença das fases cristalinas anatase e rutilo. Estas fases cristalográficas podem ser confirmadas através existência dos picos correspondentes aos planos (101), (004) e (200) no caso da fase cristalina anatase e (110), (111) e (002) no caso da fase cristalina rutilo. Recorrendo-se à utilização da equação de Scherrer determinou-se o tamanho médio das nanopartículas de TiO₂. De acordo com a largura a meia altura referente ao pico de difracção do plano (101) correspondente a $2\theta = 25,3^\circ$, determinou-se que o tamanho médio das nanopartículas é de 33nm.

Molhabilidade superficial

A produção de superfícies com capacidade autolimpante tem sido maioritariamente alcançada através do desenvolvimento de superfícies hidrofílicas (ângulos de contacto inferiores a 90°) e hidrofóbicas (ângulos de contacto situado no intervalo entre os 90° e os 120°). A molhabilidade entre um líquido e um sólido depende do balanço entre as tensões interfaciais (designadamente água/ar, água/sólido e

sólido/ar). O ângulo de contacto (AC) formado por uma gota de água sobre uma superfície sólida permite avaliar o efeito da exposição à radiação UV na molhabilidade superficial. Deste modo, um ângulo de contacto de 0° corresponde à existência de uma superfície super-hidrofílica, enquanto que superfícies super-hidrofóbicas deverão apresentar ângulos de contacto de 180° (superfícies não molháveis ou repelentes da água).

A Figura 7 mostra as imagens de uma gota de água depositada na superfície de substratos betuminosos (não modificados e modificados pela aspersão de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ com concentração de 10g/L – amostra 1).

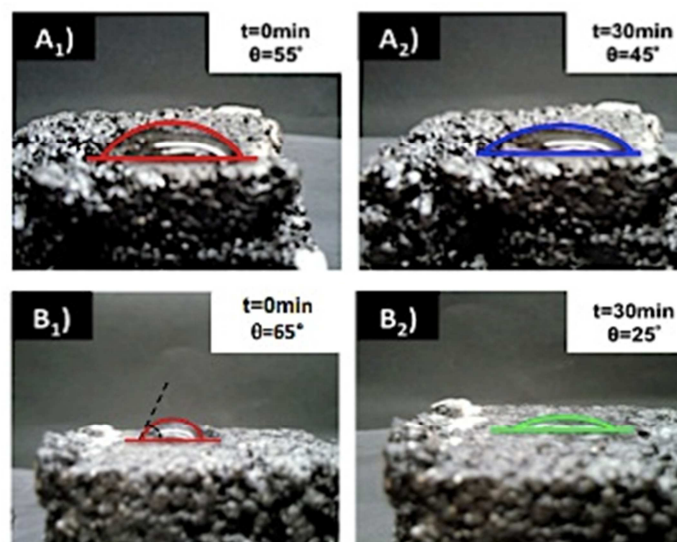


Fig. 7. Imagens relativas à presença de uma gota de água na superfície de: A) substrato betuminoso não modificado e B) substrato betuminoso modificado pela aspersão de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO₂. Os índices 1 e 2 referem-se a diferentes instantes de tempo, nomeadamente t = 0min e t = 30min, respectivamente.

A observação da Figura 7 indica que, após 30 minutos, o ângulo de contacto na superfície do substrato betuminoso não modificado e da amostra 1 apresentava o valor de 45° e 25° , respectivamente. Ambas as amostras possuem uma superfície com natureza hidrofílica. No entanto, verifica-se que a maior redução percentual do ângulo de contacto (61,5%) ocorre na amostra modificada pela aspersão de material semiconductor.

Através dos resultados obtidos é possível concluir que a adição de material semiconductor permite desenvolver superfícies com maior grau de hidrofiliidade e, por isso, contribuir para que estas possam ser mais fácil e eficazmente lavadas pela água da chuva. Do ponto de vista de uma aplicação prática, a hidrofiliidade permite minimizar o efeito de derrapagem de veículos automóveis. Por isso, pode contribuir para a diminuição de alguns acidentes de viação que ocorram devido às primeiras chuvas de Outono (presença de óleos e gorduras adsorvidas à superfície dos pavimentos betuminosos).

Avaliação da actividade fotocatalítica dos substratos betuminosos modificados

A actividade fotocatalítica dos substratos betuminosos modificados foi avaliada através da irradiação de luz UV e da medição da variação da absorvância de uma solução aquosa de MB. Neste trabalho, verificou-se que a coloração da solução de AM alterou-se de azul-escuro para azul pálido na presença do material semiconductor (actua como catalisador das reacções *redox*). Por outro lado, os substratos betuminosos (não modificados) que foram submetidos ao mesmo processo não provocaram qualquer tipo de descoloração da solução aquosa de AM. Este comportamento indica, claramente, que na ausência de material semiconductor não ocorrem mecanismos de oxidação-redução.

Na Figura 8 apresenta-se um espectro de absorvância referente à **amostra 1** que corresponde à modificação da mistura asfáltica através da aspersão de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ com concentração de 10 g/L.

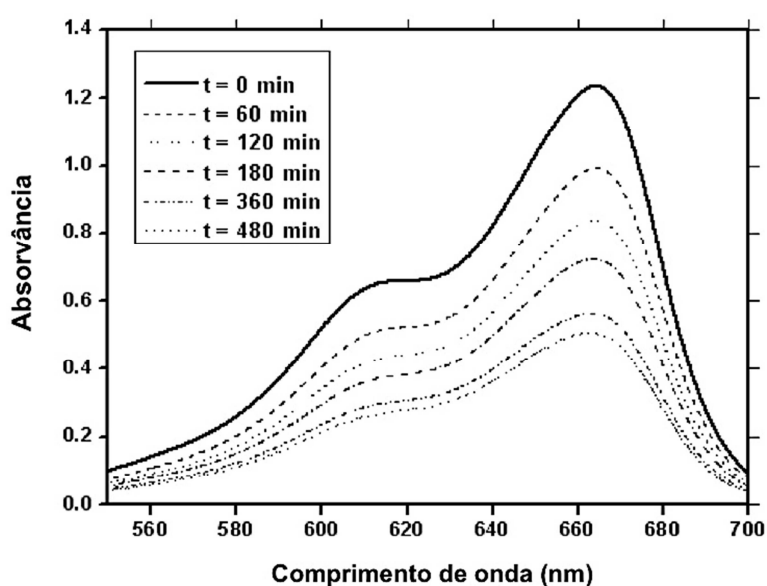


Fig. 8. Espectro de absorvância de uma solução aquosa de AM obtido para diferentes instantes de tempo.

A análise da Figura 8 mostra a diminuição ao longo do tempo do valor da absorvância máxima. Este comportamento demonstra inequivocamente a ocorrência do processo de fotodegradação. Na Figura 9 apresentam-se os valores correspondentes ao rendimento do processo de fotodegradação relativos aos 4 substratos betuminosos modificados.

Os resultados obtidos, indicam que os valores de rendimento mais elevados são atingidos através da utilização da técnica de deposição por aspersão (60% em comparação com 45% obtido pela incorporação em volume). Por outro lado, também é verificado que, independentemente da técnica de modificação utilizada, os rendimentos maiores são obtidos para as amostras que contêm concentrações mais elevadas de nanopartículas de TiO₂. Na verdade, estes resultados eram expectáveis na medida em que, o número de nanopartículas por unidade de área superficial existentes nos substratos betuminosos modificados pela aspersão de nanopartículas (amostras 1 e 2) é superior ao que existe nos substratos modificados com a inserção volumétrica (amostras 3 e 4).

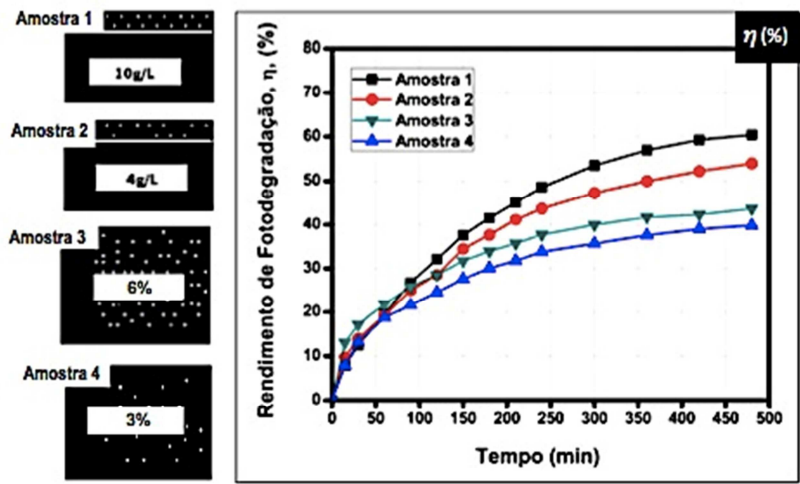


Fig. 9. Curvas representativas do rendimento de fotodegradação de todos os substratos betuminosos modificados.

Contudo, em contexto real, os pavimentos rodoviários estão permanentemente sujeitos à acção de desgaste mecânico que advém da intensa circulação de veículos automóveis. Neste sentido, a utilização de pavimentos com capacidade multifuncional só será exequível desde que esta característica consiga ser mantida após processos de desgaste mecânico. A Figura 10 apresenta os valores do rendimento do processo de fotodegradação após a acção de desgaste mecânico.

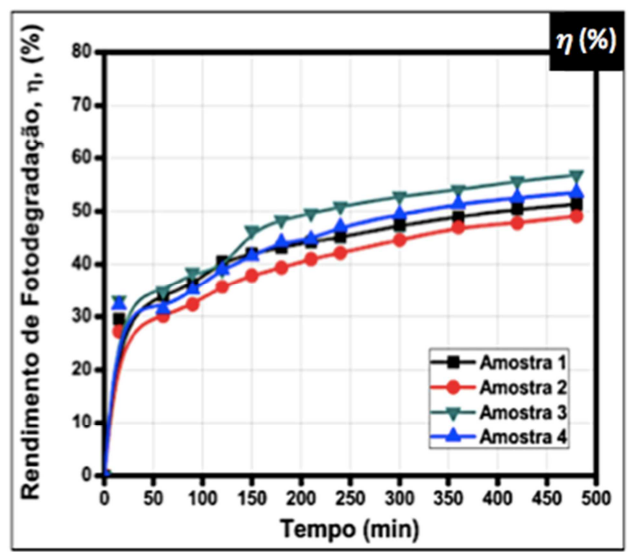


Fig. 10. Curvas representativas do rendimento de fotodegradação de todos os substratos betuminosos modificados após desgaste mecânico.

Os resultados apresentados na Figura 10 indicam que os valores de rendimento mais elevados são alcançados para os substratos betuminosos desenvolvidos com incorporação volumétrica de nanopartículas de TiO₂ (57% em comparação com 51% obtido pela técnica de deposição por aspersão).

Por outro lado, verifica-se novamente que os rendimentos maiores são obtidos para as amostras que contêm concentrações mais elevadas de nanopartículas de TiO₂, independentemente da técnica de modificação utilizada. Este resultado não é surpreendente já que, a acção de desgaste mecânico conduz à remoção de nanopartículas de TiO₂ presentes na superfície do substrato. No entanto, este efeito é mais pronunciado para o caso dos substratos aspergidos com solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ (amostras 1 e 2). Entretanto, considerando as amostras 3 e 4, embora a acção de desgaste mecânico conduza à remoção superficial de material semiconductor, deverão ainda subsistir algumas camadas de nanopartículas que se encontravam inicialmente subjacentes e, por isso, conduzindo a valores mais elevados do rendimento fotocatalítico.

CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliou-se os “benefícios” para a pavimentação rodoviária da utilização de nanomateriais (na forma de nanopartículas) na produção de “novas” misturas asfálticas. Para o efeito, as misturas asfálticas padrão foram modificadas pela adição de nanopartículas de TiO₂ através de dois processos diferentes. No primeiro processo, as nanopartículas de TiO₂ foram volumetricamente incorporadas durante o processo da formulação betuminosa, usando-se duas diferentes concentrações (3 e 6% em peso). O segundo processo de modificação consistiu na aspersão superficial de uma solução aquosa de nanopartículas de TiO₂ com concentrações diferentes (4 e 10 g/L). Foram utilizadas diversas técnicas de caracterização que visaram estudar: a composição química do ligante asfáltico, a influência do pH na sua morfologia e topografia superficial, as fases cristalográficas dos pós de TiO₂, a molhabilidade das superfícies modificadas e a sua capacidade fotocatalítica. De acordo com os resultados obtidos e tendo em consideração a possível aplicação em contexto real, poderão ser estabelecidas as seguintes considerações:

- Cenário 1 - aplicação de pavimentos em parques de estacionamento, ciclo-vias, entre outros (ausência de desgaste elevado): neste cenário, a tomada de decisão deverá recair na utilização de um pavimento com uma formulação e modificação idêntica à da amostra 1. Na verdade, esta amostra é aquela que apresenta o maior rendimento do processo de fotodegradação antes da acção de desgaste mecânico (60,4%). Após desgaste, mantém ainda um dos valores mais elevados de rendimento (51,3%).
- Cenário 2 – utilização de pavimentos rodoviários em estradas nacionais, auto-estradas, aeroportos, entre outras (desgaste elevado): neste caso, a escolha deverá incidir na formulação e modificação equivalente à da amostra 3. Com efeito, esta amostra apresenta o valor mais elevado de rendimento após acção de desgaste mecânico (56,8%) sendo muito próximo do valor obtido para a amostra 1 antes de desgaste mecânico. Contudo, na perspectiva da análise económica, a utilização de um pavimento com características semelhantes à da amostra 3, conduz a investimentos mais avultados já que obriga à utilização de uma quantidade considerável de nanopartículas de TiO₂.

AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento ao Laboratório de Engenharia Civil da Universidade do Minho que demonstrou enorme empenho na preparação das misturas asfálticas. Agradecem ainda ao Professor Jorge Neves por ter disponibilizado o acesso a alguns equipamentos laboratoriais que permitiram efectuar algumas das técnicas de caracterização utilizadas no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Robertson, R.E., "Chemical Properties of Asphalts and Their Relationship to Pavement Performance". Strategic Highway Research Program. 1991.
- [2] Hanson, D.I., Foo, K., "Evaluation and Characterization of a Rubber Modified Hot Mix Asphalt Pavement". National Center For Asphalt Technology. April 2004.
- [3] Heller, A. *Acc Chem Res*, 28 (1995), 503-508. *Journal of Photochemistry and Photobiology C. Photochemistry Reviews* 1, Vol.1(2000), p.1-21.
- [5] Yoichi, I., Junya, S., Shoichi, A., Takashi, N., Shigeyoshi, M. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 188. (2007), pp. 106–111.
- [6] Dalton, J.S., Janes, P.A., Jones, N.G., Nicholson, J.A., Hallam, K.R., Allen, G.C. *Environmental Pollution* 120 (2002). pp. 415-422.
- [7] Vinu, R., Giridhar, M. *Journal of Indian Institute of Science*, Vol 90:2 (2010).
- [8] Chen, C.H., Kelder, E.M., Schoonman, J. *Thin Solid Films* 342 (1999) p.35.
- [9] Gouttebaron, R., Cournelissen, D., Snyders, R., Dauchot, J.P., Wautelet, M., Hecq, M. *Surface and Interface Analysis* 30 (2000) p.527.
- [10] Carneiro, J.O., Teixeira, V., Portinha, A., Dupák, L., Magalhães, A., Coutinho, P. *Vacuum*, 78 (2005) 37-46.
- [11] Wang, J., Fan, T., Buckley, S.J. "Evaluation crude oils by SARA analysis". Paper SPE-2002 (75228) presented at SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium in Tulsa, Oklahoma, 2002.
- [12] Tissot, P.B., Welte, H.D. "Petroleum formation and occurrence: A new approach to oil and gas exploration", Springer-Verlog, Berlin, Heidelberg, 1978.
- [13] Speight, G.J. "Handbook of petroleum analysis", John Wiley & Sons, Laramie, Wyoming, 2001.
- [14] Gauthier, T., Danial-Fortain, P., Merdrignac, I., Guibard, I., Anne-Agathe Quoineaud. *Catalysis Today* 130 (2008) 429-438.
- [15] Yasar, M., Akmaz, S., Ali Gurkaynak, M. *Fuel* 86 (2007) 1737-1748.
- [16] Ancheyta, J., Centeno, G., Trejo, F. *Fuel* 83 (2004) 2169-2175.
- [17] Yen, T.F. "Asphaltene/Resin plus oil interconversion: an investigation into colloidal model of asphaltenes". In: *Proceedings of Workshop - The chemical components and structure of asphaltic materials*, Roma, 1991.
- [18] Jenkins, R.H., Snyder, R.L. *Introduction to X-ray Powder Diffractometry*. John Willey and Sons, New York (1996).

Gestão do ruído
Noise management

O ENQUADRAMENTO LEGAL DO RUÍDO EM PORTUGAL

HISTÓRIA E DESAFIOS

Jorge Patrício
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

INTRODUÇÃO

A presente comunicação tem como objetivo fundamental dar uma panorâmica da evolução do enquadramento regulamentar no domínio do controlo do ruído em Portugal, ocorrida nas últimas 3 décadas, como instrumento jurídico de apoio ao desenvolvimento social e aos quadros processuais de integração urbanística, assim como perspetivar desafios futuros numa linha de redução do ruído global e melhoria da componente acústica do ambiente, contribuindo para uma melhor sustentabilidade da vivência humana. Neste sentido, faz-se uma apresentação do quadro legal vigente ao longo dos tempos, das razões que forma sustentando a sua evolução e das principais implicações delas decorrentes. Por último, e tendo em atenção que, num contexto global, a principal contribuição para o ruído ambiente assente na circulação do tráfego rodoviário, são elencados os aspetos principais com ele relacionados, tanto na perspetiva dos processos e mecanismos de controlo do ruído, como de opções legais correlacionadas.

HISTÓRIA

Em Portugal, as preocupações referentes ao ruído e aos seus efeitos sobre pessoas, e até animais, têm uma história já relativamente longa (25 anos). De facto, desde o ano de 1987 que existe no País um quadro legal relacionado com a proteção contra o ruído.

A primeira legislação sobre o ruído (Decreto-Lei n.º 251/87, de 24 de Junho) entrou em vigor em janeiro de 1988, e contemplava, substancialmente, aspetos relacionados com a acústica de edifícios e o exercício de atividades comerciais, estabelecendo requisitos a serem cumpridos nos novos edifícios, em termos de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão, e condições específicas de emissão de ruído no licenciamento de estabelecimentos comerciais, de serviços, ou similares. Para além disso, também preconizava – todavia, com menor grau de importância -, requisitos acústicos para edifícios de escritórios, e outros espaços análogos, visando o estabelecimento de condições de concentração e sossego no trabalho.

Para efeitos de zonamento do uso do solo, o Decreto-Lei n.º 251/87 incluía disposições para classificação acústica de zonas urbanizadas (ou urbanizáveis), com base na caracterização dos níveis de ruído ambiente existentes, considerando a definição de 3 zonas acústicas: *i) pouco ruidosa; ii) ruidosa; e iii) muito ruidosa.*

Esta primeira legislação sobre o ruído – pioneira para o despertar da consciência social para a temática - esteve em vigor, praticamente, durante 12 anos!

No ano 2000, e de acordo com os princípios constantes no livro verde sobre o ruído, foi preparado um novo conjunto de disposições normativas para substituição do regulamento de 1987. Nesta altura, a regulamentação acústica portuguesa foi subdividida em dois ramos, um relacionado com a acústica

ambiental e outro com a acústica de edifícios, estabelecendo-se a interface “acústica” entre os dois documentos legais através do elemento de compartimentação exterior *fachada*. O ramo ambiental deu origem ao Regime Legal da Poluição Sonora (Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro, entrando em vigor em maio de 2001) e o da acústica de edifícios ao Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio, que entrou em vigor em julho de 2002).

Mais recentemente (meados da primeira década do novo milénio), e por força da transposição para o direito interno da Diretiva Europeia sobre Gestão e Avaliação do Ruído Ambiente (DRA), toda a legislação nacional sobre o ruído foi alvo de um processo de adaptação ao novo enquadramento legal introduzido por essa diretiva, fundamentalmente no que respeitou aos indicadores de ruído ambiente por ela propostos, respetivamente L_{den} e L_n (nível sonoro médio de longa duração, diurno-entardecer-noturno, e nível sonoro determinado durante uma série de períodos noturnos representativos de um ano).

Faz-se notar que o indicador L_{den} , para além de ser dependente do indicador do período noturno, é também dependente dos indicadores associados ao período do dia e entardecer, cujas definições são em tudo idênticas à do período noturno, sendo obtido por ponderações entre esses mesmos indicadores.

Esta transposição para o direito interno português ocorreu no ano de 2006, tendo dado origem ao Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de Julho, o qual consagra, fundamentalmente, como princípio estratégico a quantificação e a consequente redução do número de cidadãos expostos a níveis elevados de ruído nos países da Europa.

Em consequência, no sentido de integrar os referidos indicadores ambientais L_{den} e L_n , constantes dessa diretiva, na legislação nacional, o regulamento do ruído ambiente (Decreto-Lei 292/2000) teve de ser atualizado, dando assim origem ao Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro.

E, naturalmente, por recorrência, o regulamento de acústica de edifícios que regula a interface entre o local de implantação dos edifícios e o interior destes onde se requer tranquilidade e sossego, até então existente, teve também que ser adaptado, o que ocorreu com a publicação do novo Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho), assegurando-se, desta forma, coerência entre dois normativos. O diagrama cronológico seguinte permite dar uma ideia mais clara da evolução da regulamentação nacional no campo da Acústica, nos últimos 25 anos.

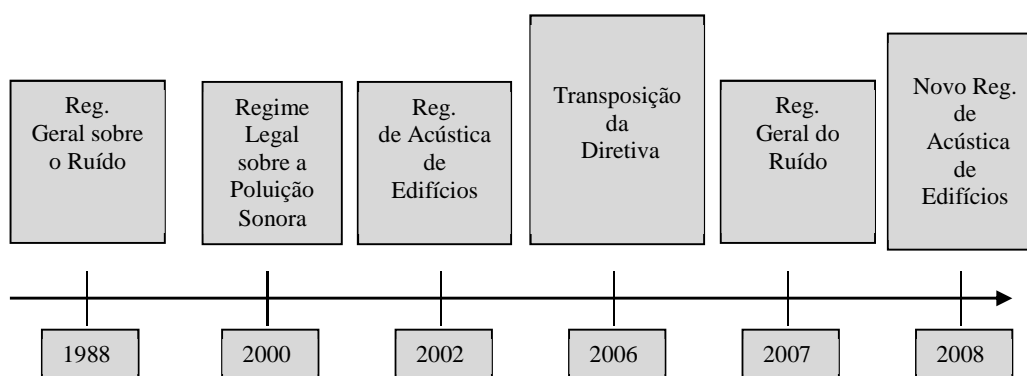


Fig. 1. Ilustração esquemática da evolução da regulamentação Portuguesa em 25 anos.

Um aspeto importante que ressalta de todo este processo é o de que a partir do ano 2000, toda a legislação acústica nacional tem como princípio base o licenciamento/planeamento em função do uso do solo, e não como previamente em que assentava na definição de zonamento a partir dos níveis de ruído existentes, ou seja antes a “entrada” era pela linha do ruído, agora é pela utilização do território. É esta a linha condutora do atual regulamento sobre o ruído ambiente (RGR) quando estabelece exigências recorrendo a critérios de zonamento, à utilização de mapas de ruído, à conceção de planos de redução de ruído e à imposição de obrigações para entidades gestoras de redes de tráfego, visando a salvaguarda da tranquilidade das pessoas que vivem, trabalham, ou simplesmente estão, em locais sensíveis ao ruído, em meios urbanos.

No que se refere ao regulamento de acústica dos edifícios, ele também vai, de forma indireta, estar dependente dos critérios ambientais preconizados pelo RGR, porquanto para que seja autorizada a construção de novos edifícios, ou mesmo a sua própria reabilitação, as disposições legais no que respeita à sua integração ambiental têm que ser observadas, no âmbito do licenciamento dos seguintes tipos de edifícios, ou daqueles que com eles se assemelham: *i) habitacionais e mistos e unidades hoteleiras; ii) Edifícios de comércio e serviços; iii) Edifícios escolares e de investigação; iv) Edifícios hospitalares; v) Estações de transporte de passageiros; vi) Pavilhões desportivos; e vii) Auditórios e salas.*

Como se referiu, a legislação portuguesa baseia-se fundamentalmente nos critérios de permissão do uso do solo, tanto para efeitos da construção de edifícios, como implantação de acessibilidades e atividades de natureza vária. Estes critérios assentam na definição de zonas de uso sensível e misto, para as quais se parametrizam valores específicos de ruído ambiente. A definição (ou classificação) destas zonas é da responsabilidade dos municípios, os quais devem integrá-las nos seus instrumentos de gestão de política territorial. Neste sentido, cada município deve ter disponível o mapa de ruído das suas urbanizações, existentes ou previstas, e, na sequência do cruzamento da definição administrativa de uso com os valores de ruído ambiente identificados pelos mapas de ruído, devem ser elaborados planos de redução de ruído, de molde a enquadrar o ruído existente com os valores limite máximos previstos na lei.

No que respeita aos edifícios, e mormente às exigências em termos de isolamento das fachadas, o regulamento respetivo preconiza um índice específico, $D_{2m,n,w}$, no sentido de criar condições de conforto acústico interior adequados à sustentabilidade da vivência humana.

DESAFIOS

Apesar de não estar suficientemente destacado, cabe às câmaras municipais um dos papéis mais importantes na aplicação da regulamentação sobre ruído ambiente (RGR), porquanto são elas que estabelecem as bases do seu ordenamento territorial (PMOTs ou PDMs), base essa em que assenta toda a estrutura regulamentar do regulamento do ruído, fundamentalmente a definição do zonamento uso/acústico das respetivas áreas urbanas, existentes ou previstas.

Os planos municipais de ordenamento do território (PMOTs) são um instrumento de planeamento e gestão territorial de importância crucial para o desenvolvimento harmonioso das cidades modernas e para a sustentabilidade futura do modelo de vivência humana. Neste sentido, a existência, nestes instrumentos de informação relacionada com o ruído, assume particular destaque para a efetiva

abrangência destes planos, assim como para a sua desejável interligação com as perspectivas de ecologia social.

A integração das classificações associadas ao uso do solo nos PMOTs e a pedra basilar de uma percentagem muito significativa das linhas de força do RGR. A não consideração do zonamento de uso do solo nos instrumentos de gestão territorial, pode originar a assunção, por defeito, de um único tipo de classificação – naturalmente, e por princípio, a mais desfavorável – tornando grande parte das disposições desse regulamento em algo inócuo.

É pois **fundamental** que as autarquias assumam as suas responsabilidades ambientais e cumpram o preconizado no n.º 3 do artigo 6.º do RGR, tendo em atenção também o referido no n.º 4 desse mesmo artigo que tem a ver com uma estratégia preventiva por parte dos municípios relativamente ao tipo de usos a permitir na envolvente próxima de grandes infra-estruturas de transporte, e que possam ser classificadas como sensíveis. O cruzamento desta informação é fundamental para as avaliações de impacto ambiental associadas aos vários modos de transporte, e muito especificamente ao modo rodoviário, o qual, numa perspectiva global, é assumidamente o maior causador de elevados níveis de ruído ambiente no País.

No que respeita ao tráfego rodoviário, o RGR consagra no seu artigo 19º, as seguintes disposições regulamentares.

Artigo 19.º

Infraestruturas de transporte

1 - As infraestruturas de transporte, novas ou em exploração à data da entrada em vigor do presente Regulamento, estão sujeitas aos valores limite fixados no artigo 11.º.

2 -

3 - Para efeitos do disposto nos números anteriores, devem ser adoptadas as medidas necessárias, de acordo com a seguinte ordem decrescente de preferência:

a) Medidas de redução na fonte de ruído;

b) Medidas de redução no meio de propagação de ruído.

4 - Excepcionalmente, quando comprovadamente esgotadas as medidas referidas no número anterior e desde que não subsistam valores de ruído ambiente exterior que excedam em mais de 5 dB(A) os valores limite fixados na alínea b) do n.º 1 do artigo 11.º, podem ser adoptadas medidas nos receptores sensíveis que proporcionem conforto acústico acrescido no interior dos edifícios adoptando valores do índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, normalizado, $D_{2m,n,w}$, superiores em 3 dB aos valores constantes da alínea a) do n.º 1 do artigo 5.º, da alínea a) do n.º 1 do artigo 7.º e da alínea a) do n.º 1 do artigo 8.º, todos do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios.

5 - A adopção e implementação das medidas de isolamento sonoro nos receptores sensíveis referidas no número anterior compete à entidade responsável pela exploração das infraestruturas referidas nos n.º 1 e 2 do presente artigo ou ao receptor sensível, conforme quem mais recentemente tenha instalado ou dado início à respectiva actividade, instalação ou construção ou seja titular da autorização ou licença mais recente.

Estas disposições criam, pois, um quadro de desafios científicos, tecnológicos e sociais, especialmente no que respeita à aplicação do n.º 3 do artigo em causa. Na realidade, as medidas de redução mais eficientes devem ser por ordem preferencial as expostas, tanto do ponto de vista científico como de sustentabilidade e de compromissos económicos. A redução do ruído na fonte, para além do que pode ser feito ao nível dos próprios veículos em termos de aerodinâmica e amortecimento de sistemas, etc, assenta muito na redução do ruído associado à interface pneu pavimento, onde a qualidade da camada de desgaste da rodovia, entendida como potencial fonte emissora de ruído, desempenha um papel

assaz relevante. Apesar dos progressos que se têm ultimamente conseguido, materializado em muitos estudos realizados e em composições de novos materiais, há pois aqui um grande **desafio** tecnológico a encarar. E este desafio é tanto maior quanto a importância de se considerar que as soluções correctivas a efectuar no âmbito da potencial fonte de ruído, são sempre as mais eficientes e toleráveis do ponto de vista da aceitação pública e interiorização de eficácia.

E o mesmo se poderá dizer relativamente aos meios de redução do ruído no caminho de transmissão, ou seja no espaço físico entre a fonte de ruído (tráfego) e os receptores (normalmente edifícios). Todavia, sendo estas soluções mais invasivas e podendo originar outros tipos de impactes, como sejam os de natureza visual, obstrução de luz solar, perturbação da integração paisagística, permite concluir que os grandes esforços no controlo e redução do ruído devam ser feitos na origem da sua geração, ou seja na própria fonte, ou nas sub-fontes que a compõem.

No que respeita aos valores-limite de exposição, e relativamente aos quais a avaliação de impacte ambiental ou da emergência de níveis sonoros elevados, tem que ser realizada, estes encontram-se dispostos no artigo 11.º do RGR, para várias situações de aglomeração urbana (existente ou prevista) e respetivo cruzamento com as designadas GITs “Grandes infra-estruturas de transporte terrestre e aéreo”, quando as há, cuja definição para o caso do tráfego rodoviário é a seguinte [vd. alínea g) do artigo 3.º do RGR]:

g) «Grande infra-estrutura de transporte rodoviário» o troço ou conjunto de troços de uma estrada municipal, regional, nacional ou internacional identificada como tal pela Estradas de Portugal, E.P.E., onde se verifique mais de três milhões de passagens de veículos por ano;

Na circunstância, se a infra-estrutura de transporte rodoviário for definida, em função do tráfego, como GIT, está prevista uma despenalização de exigências as zonas sensíveis, de 10 dB(A) se essa infra-estrutura já existe, e de 5 dB(A) se a infra-estrutura for nova. Atente-se que, neste contexto e no âmbito do cumprimento de disposições da DRA nas GITs de tráfego rodoviário, se encontram já aprovados mapas estratégicos de ruído para cerca de 1680 km de via (ou seja, cerca de 96% do total declarado, 1973 km) e que de um ponto de vista de exposição a classes de ruído têm os valores da Tabela 1 (Relatório do Estado do Ambiente, Agência Portuguesa do Ambiente, Lisboa, 2011).

Tab. 1. População exposta a classes de ruído, para GITs de tráfego rodoviário; 1ª fase da DRA.

Descritor	[≤ 45 - < 55] dB(A)	[≤ 55 - < 65] dB(A)	[≤ 65 - < 75] dB(A)	> 75 dB(A)
L_{den}	-	624900	116200	13800
L_n	259200	154300	21700	-

Refere-se que, se não existir ainda zonamento legalmente consagrado, a despenalização prevista de 10 dB(A) e de 5 dB(A) se reduzirão apenas a 8 e 3 dB(A), e haverá uma penalização referente aos valores-limite correspondentes às zonas mistas de 2 dB(A), ficando assim para zonas não classificadas $L_{den} \leq 63$ dB(A) e $L_n \leq 53$ dB(A), ou seja haverá uma contração de 2 dB(A) de não permissão/tolerância. Note-se que apesar da regulamentação nacional ter uma vigência assaz abrangente do ponto de vista temporal, esta não deixa de ser uma realidade objectiva, existente ainda

nos dias de hoje. De fato, o papel das entidades que detêm jurisdição administrativa do território tem sido pouco assumido no contexto do planeamento urbano e na respectiva integração dos zonamentos de uso nos seus (PMOTs), situação esta que tem originado inconsistências significativas no que respeita a Estudos de Impacte Ambiental.

Por último, não pode deixar de se referir que para além das soluções de desenvolvimento tecnológico e científico referidas, **haverá que ter em conta aspetos** ligados à perceção das populações afetadas, adequando a natural evolução do quadro legal vigente a uma nova realidade que possibilita o usufruto de uma vivência mais tranquila, podendo tal passar por inclusão de mais descritores de ruído, correções específicas para determinados tipos de ruído, e um planeamento mais equilibrado.

BIBLIOGRAFIA

1. PATRÍCIO, J. *Ambiente e Edificação: Legislação Acústica Anotada*. Sítio do livro, Lisboa, 1ª Edição, 2010, 1ª edição 2010 (200 páginas).
2. ARSÉNIO, E.; PATRÍCIO, J. – *The economic valuation of noise in Portugal: Some findings from its former stated preference experiment*. Em Congresso Acústica 2004, Comunicações, Guimarães, Portugal, 14 a 17 de Setembro de 2004, CD-ROM.
3. PATRÍCIO, J. – *O estado de implementação da regulamentação acústica em Portugal*. Em XXXVI Congreso Nacional de Acústica, Encuentro Iberico de Acústica e European Acoustics Association Symposium on Environmental Noise. Comunicações, Terrasa, Espanha, 19 a 21 de Outubro de 2005, CD-ROM.
4. SÓNIA, A.; PATRÍCIO, J. – *Estrutura de uma base de dados de medidas de minimização de impactes ambientais devidos ao ruído*. Em XXXVII Congreso Nacional de Acústica, Encuentro Iberico de Acústica e European Acoustics Association Symposium on Hydroacoustics. Comunicações, Gandia, Espanha, 18 a 20 de Outubro de 2006, CD-ROM.
5. PATRÍCIO, J. – *Environmental noise legislation. The experience in Portugal*. Em V Giornata de Studio sull Acústica. Comunicações, Sociedade Italiana de Acústica, Firenze, Itália, 10 de Aprile de 2008.
6. ANTUNES, M. L.; COUTINHO, A. S.; PATRÍCIO, J.; et al - *Avaliação do Ruído de Tráfego: Metodologia para a Caracterização de Camadas de Desgaste Aplicadas em Portugal*. Em Seminário sobre Avaliação das Características dos Pavimentos, Universidade do Minho, Guimarães, 20 de Novembro de 2008, CD-ROM.
7. PATRÍCIO, J. – *Situação da acústica ambiental e da edificação acusticamente sustentável, em Portugal*. Em Congresso Técnicoacústica 2009-40.º Congreso Nacional de Acústica, Encuentro Ibérico de Acústica e Simpósio Iberoamericano e Europeo sobre Acústica Ambiental e Edificación Acusticamente Sostenible. Comunicações, Cádiz, Espanha, 23 a 25 de Septiembre de 2009, CD-ROM.
8. ANTUNES, S.; REBELO, M.; PATRÍCIO, J.; SAMAGAI, A. – *Avaliação da perceção de medidas de minimização para o ruído de tráfego rodoviário em zonas urbanas*. Em Congresso Técnicoacústica 2010-41.º Congreso Nacional de Acústica, 6º Congreso Ibérico de Acústica e Simpósio Iberoamericano e Europeo sobre Acústica Ambiental e Edificación Acusticamente Sostenible. Comunicações, León, Espanha, 13 a 15 de Octubre de 2010, CD-ROM.

9. RGR - (Decreto-Lei n.º 251/87, de 24 de Junho)
10. RLPS - (Decreto-Lei n.º 292/2000, de 14 de Novembro)
11. RRAE - (Decreto-Lei n.º 129/2002, de 11 de Maio).
12. DRA - (Decreto-Lei n.º 146/2006, de 31 de Julho)
13. RGR - (Decreto-Lei n.º 9/2007, de 17 de Janeiro)
14. RRAE - (Decreto-Lei n.º 96/2008, de 9 de Junho)

ASSESSMENT & MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL NOISE IN EU - THE CONTRIBUTION OF TYRE-ROAD NOISE REDUCTION

F. Anfosso-Lédée
IFSTTAR (*French Institute of Science and Technology for Transport,
Development and Networks*), Nantes, France
fabienne.anfosso@ifsttar.fr

INTRODUCTION

Recent estimations indicate that more than 30 % of EU citizens are exposed to road traffic noise levels above acceptable limits as viewed by the World Health Organisation (WHO) and that about 10 % of the population report severe sleep disturbance because of transport noise at night [1].

There are two distinct approaches for reducing the problems caused by noise pollution. First, governments can adopt an approach called “integrated planning”, which consists in preventing noise pollution problems by an integrated planning approach to transportation and land use. This approach requires concerted action at all levels of government so that the measures taken meet community needs. For road traffic noise abatement, this includes an efficient land planning system, the introduction of noise mitigation criteria in traffic management systems, incentives to develop, optimize and use quiet low noise technologies regarding vehicles, tyres and road surfaces. This global approach is expected to be the most efficient and cost effective one. It can be achieved through the support of research/development, the development of standards, or through adapted regulations.

Second, a corrective approach can be used to correct the main problems through abatement measures (low noise pavements, anti-noise screens, berms, re-routing, traffic management such as speed limit or optimised crossroads, etc.). This approach is well adapted to noise pollution problems caused by an existing highway network. In the case of new developments near existing highways, the corrective approach can also be relevant if all the interested parties take steps to control noise sensitive areas.

In Europe, the European Union (E.U.) adopted in 2002 the directive 2002/49/EC relating to the assessment and management of environmental noise. The purpose of the directive is to “*define a common approach intended to avoid, prevent or reduce on a prioritised basis the harmful effects, including annoyance, due to the exposure to environmental noise*”. The directive refers to the corrective and integrated planning approaches. It requires the EU Member States to carry a number of actions, such as drawing strategic noise maps and action plans.

After presenting the main features of the directive and the more recent outcomes, a review on road noise management actions will be made. A specific focus on tyre-road noise reduction will be made, in which low noise pavements take a crucial part.

ASSESSMENT AND MANAGEMENT OF ENVIRONMENTAL NOISE: THE EUROPEAN DIRECTIVE 2002/49/EC

Main objectives and content

Noise assessment from the four main noise sources (i.e., road traffic, railway traffic, industrial and aircraft) is required under the EU Directive on the assessment and management of environmental noise (2002/49/EC) (END) [2]. The objectives of this Directive are:

- to determine the EU population exposure to environmental noise. Competent authorities in Member States are required to produce *strategic noise maps* that will permit the global evaluation of noise exposure and forecast the evolution of noise levels. They will be used to assess the number of people annoyed and sleep-disturbed respectively throughout Europe;
- to make available to the European citizens reliable information on the noise levels they are exposed to and the associated health implications. This is partly achieved through the publication of the strategic noise maps and a number of other reference studies;
- to draw appropriate *action plans* for preventing and reducing exposure to harmful noise levels. Action plans will list the measures to be taken for noise reduction in critical situations identified on the strategic noise maps;
- to develop Community measures to reduce noise at source.

The Directive does not set any limit value, nor does it prescribe the measures to be used in the action plans, which remain at the discretion of the competent authorities. The noise assessment concerns the yearly average traffic on major networks and in major agglomerations in Europe (i.e. more than 100 000 inhabitants).

Strategic noise maps

For the purpose of strategic noise mapping, the harmonized noise indicators L_{den} and L_{night} are to be used. These indicators reflect yearly average equivalent levels. L_{den} represents noise levels over day, evening and night periods, whereas L_{night} represents noise levels at night. Corresponding time periods are to be defined by the European Member States (EU MS), using 12 hours daytime, 4 hours evening time and 8 hours night time. Noise levels are assessed at 4 meters, height at the most exposed façade of dwellings. Strategic noise mapping includes:

- graphical documents:
 - a graphical representation of equal noise areas per 5 dB(A) step, starting from $L_{den} > 55$ dB(A) and $L_n > 50$ dB(A), together with the source localisation
 - the areas in which noise levels exceed the limits
 - the evolutions that can be anticipated
- numerical data:
 - the estimation of the number of buildings identified in critical zones, the number of corresponding people
 - the surfaces of exposed areas

Noise indicators are evaluated, mostly by using noise prediction models. In some cases, measurements can complement this evaluation.

For road traffic source, strategic noise maps have to be drawn for all roads within agglomerations and for all major road infrastructures bearing more than 3 Million vehicles per year (i.e. approximately 8.000 vehicles per day on average). Noise levels are calculated at distance up to 500 m to 600 m from the road infrastructure.

Finally, strategic noise maps must be made public and must be updated every 5 years. The first strategic noise maps were issued in 2007, the next round is due in 2012 (Figure 1).

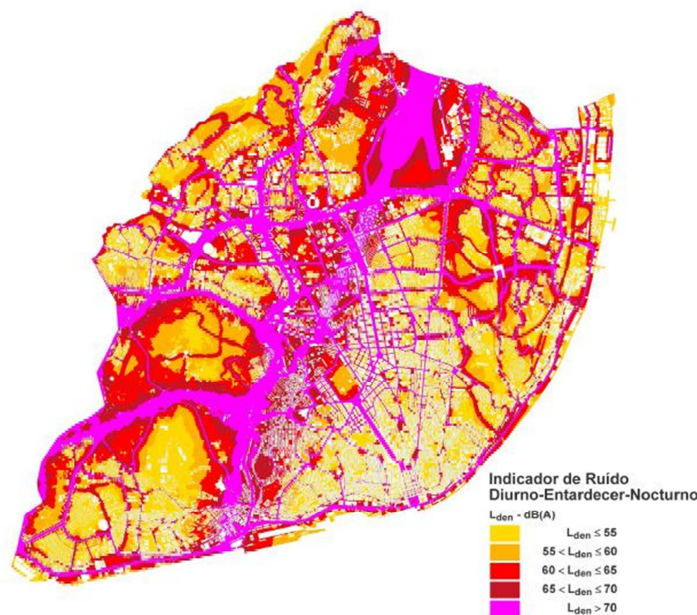


Fig.1. Example of a strategic noise map: city of Lisbon, L_{den}

Common assessment methods: CNOSSOS-EU

In this context, the European Commission decided to prepare **common methods** for road, railway, aircraft and industrial noise assessment, in order to better mitigate the accuracy and the comparability of strategic noise maps in Europe. It is actually foreseen in article 6 of the Directive that: “*common assessment methods for the determination of L_{den} and L_{night} shall be established by the Commission in accordance with the procedure laid down in Article 13(2) through a revision of Annex II*”. Thus, a set of methods called CNOSSOS-EU (Common NOise aSSessment methods in EU) was developed by the Joint Research Center (JRC) of the European Commission with the involvement of a large panel of European noise experts [3].

CNOSSOS-EU is actually a methodological framework combining prediction methods (“standards”) and implementation tools (guidelines, software, database, etc). The prediction methods of CNOSSOS-EU should be published shortly. It is EC’s intention to require the use of these methods as mandatory for the purpose of strategic noise mapping starting from the 2017 round. The use of the CNOSSOS-EU methods will be optional for noise action planning. Further developments are foreseen for providing the implementation tools of the methodological framework: guidelines, emission database,

reference software development and validation, optimised reporting mechanism, burden of disease estimation, pilot studies for validation and helpdesk and training.

For the development of the **prediction methods**, the state of the art of scientific/technical/practical worldwide knowledge about the assessment of environmental noise was taken into account. On this base, models for road traffic noise emission, railway traffic noise emission, industrial noise emission, sound propagation and aircraft noise prediction have been developed. This later is mainly based on method the Document 29 (3rd Edition) of the European Civil Aviation Conference (ECAC), which combines sound emission and sound propagation. However for the other noise sources (road, railway, industries), the calculation of noise emission is separate from noise propagation, which offers a better adaptability to scientific updating and a higher suitability to impact assessment of noise reduction measures.

In the currently proposed **model for road traffic noise emission**, the traffic is split in four categories of vehicles (light motor vehicles, medium heavy vehicles, heavy vehicles and two-wheelers). All vehicles are represented by an equivalent point source, containing separate contribution of rolling noise and propulsion noise emission. This separation of emission types makes the model suitable for a specific impact assessment of noise reduction measures on rolling noise related or propulsion noise related measures. The main input parameters of the proposed model are the traffic volume and the speed, both evaluated as yearly average values per category of vehicle and time period. Additional correction factors are proposed, the most important one being the *road surface correction*. At this stage, no values of such correction are proposed and the method for estimating the correction will be provided in the Guidelines.

ROAD NOISE MITIGATION

Road traffic noise: a plague of modern societies

In a recent report, the World Health Organization (WHO) reviewed and demonstrated the effects of environmental noise on annoyance and health, including cardiovascular disease, cognitive impairment, sleep disturbance, physiological stress reactions and tinnitus [4]. It is estimated that at least one million healthy life years are lost every year from traffic related noise in the western part of Europe. Annoyance and sleep disturbance - mostly related to road traffic noise - are the main nuisance due to environmental noise. Compared with other stressors, road traffic noise pollution mostly shows an increasing trend, due to the combination of growing urbanisation, increasing demand for motorized transport and inefficient urban land planning.

In addition to health related costs, noise pollution induces devaluation in house prices, productivity losses, costs related to premature death. The social costs of road and railway traffic noise across the European Union were estimated around 40 billion Euros per year, out of which 90% were attributed to passenger cars and heavy goods vehicles [5].

Road traffic is the main source of environmental noise. The assessment relating to the first round of noise mapping in Europe showed that almost 67 million people (i.e. 55 %) living in agglomerations with more than 250 000 inhabitants are exposed to daily road noise levels exceeding 55 dB L_{den} (noise indicator for day, evening and night periods) (Figure 2 from [6]). With almost 48 million people exposed to levels exceeding 50 dB L_{night} , road noise is also by far the largest source of exposure to

night-time transport noise. A large numbers of people still live in “hot spots” where transport noise levels are likely to have severe effects on human health. Here again, road traffic is the main source of noise exposure. Outside agglomerations, major roads are responsible for the exposure to daily noise above 55 dB L_{den} of 34 million people and for the exposure to night noise above 50 dB L_{night} of 25 million people [7]

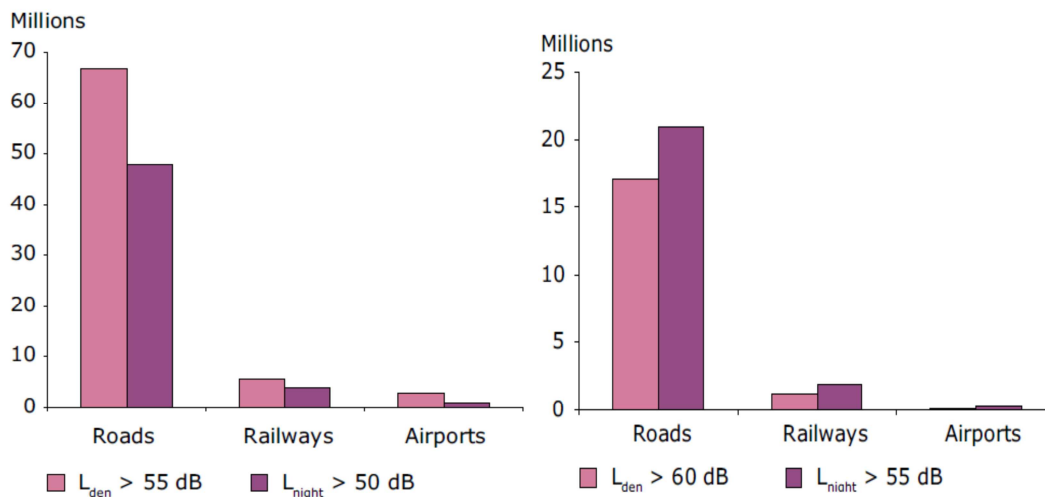


Fig. 2. People exposure to transport noise in agglomeration > 250.000 inhabitants in EU-27: people affected (left) and people living in “hot spots” (right) (source : EEA report n°3/2009).

The level of noise pollution is influenced by several factors, such as traffic density, vehicle speed, and the presence of heavy vehicles, as well as highway quality and configuration. Other factors influence the perception of noise by those living near highways, such as atmospheric conditions, the proximity of highways to houses, topography or the type of environment (wooded area, industrial park, etc.) that the highway goes through. Sound propagation is not the same along a body of water or around a large parking lot compared with an environment with tall buildings or a very heavily wooded area. The level of noise pollution also varies at different times of the day and depending on traffic levels.

Current practices for road noise reduction

Environmental noise annoyance is a complex issue that integrates not only physical but also psychological and sociological phenomena. In the process, the three following steps can be distinguished: sound emission, propagation and perception. Perception is an extremely complex topic due to the great amount of individual, social, environmental and cultural parameters. Although it is a crucial step in the annoyance process, actions aiming at reducing perception are rare if existing. The principal ones are the various communication actions such as information campaigns or public meetings that Road Authorities organise for the residents. They are usually held in the frame of Environmental Impact Assessment in the case of new road projects, but can also be organised for existing roads. These communication actions can have a positive effect on the noise perception of residents.

In practice, road noise mitigation is mainly achieved by reducing or limiting sound emission and sound propagation. Existing techniques can be distinguished according to whether they affect the sound source emission or the propagation of the sound once it has been emitted. Source orientated actions are often preferred because their effect is wider and not limited to restricted areas. They are

also often claimed to be more cost-effective. Actions on noise propagation are in general easy to apply and can rapidly bring a significant noise reduction but only in a limited area. But in general, there is no unique ideal solution for reducing noise but the choice must be made according to the objectives, the technical constraints, the cost and the residents' wish. A combination of several noise reducing techniques is often used for dramatic cases.

Source oriented actions

Noise emission from road vehicles is attributed to three main sources: the propulsion noise including engine, power train, exhaust and intake systems, the tyre-road interaction noise and the aerodynamic noise. Engine noise is the dominant source at low speed i.e. below 30 km/h for passenger cars and 50 for trucks, especially in accelerating phase. Above this speed, tyre-road noise becomes the dominant source for vehicles [8]. Aerodynamic noise increases with speed but it is assumed to be dominated by tyre-road noise at least at speeds below 130 km/h. In this context, it is obvious that tyre-road noise is the principal mechanism of noise generation to be mitigated in many urban conditions and in most suburban and extra-urban conditions.

- The first action to reduce road traffic noise emission was the introduction in 1970 of regulations on **vehicle noise** emission and later on **tyre noise** emission. Thus Directive 70/157/EEC and subsequent amendments [9] defines the noise test for the type approval of new vehicles and sets noise emission limits. Directive 2001/43/EC [10] complements the vehicle noise standards by setting a test procedure and noise limit values for tyre rolling noise. According to the Green Paper [11] on future noise policy from the Commission of the European Communities (1996), noise from individual cars and trucks has been reduced by 85% and 90%, respectively, since 1970. However, despite more than thirty years of source reduction policy by means of type approval, the emission of traffic noise has not decreased. The growth of traffic has surpassed the technological improvements regarding noise emission from traffic on national roads. As a result, there has been no reduction in community exposure to road traffic noise [11]. The expected development of electric powered vehicles, however, could represent a significant breakthrough for road noise reduction in urban areas in the coming decade.
- Tyre-road noise can be limited by the use of **low noise road surfaces**. Research efforts made during the past decades both by research institutes and by road industry has led to the availability of several low noise road surfaces: porous asphalt courses in single or double layers, bituminous thin layers with small chipping size and possibly some open porosity, porous cement concrete, stone mastic asphalt thin layers, rubber asphalt pavements. Large data base of noise performances of road surfaces have been built that can help the road authorities to anticipate on the expected noise reducing by changing the road surface. They also show that the important parameters of the road surface guaranteeing a reduced noise emission are a relatively smooth macro-texture usually obtained by a small maximum aggregate size (6 to 10 mm, or even 4 mm as recently developed), and a significant void content producing some open porosity of the rolling course. The main concern when using road surface as a noise reduction technique is that the ageing effect is not sufficiently understood yet to be taken into account. Low noise road surfaces usually lose their initial properties more or less rapidly due to the effect of the traffic (wear, stripping, pavement distresses...) and physical and chemical ageing process (stiffening, clogging...). This can be even more dramatic in urban areas due to frequent works of various suppliers (gas, water, sewage...etc).

- Finally, alternative measures can be used to reduce noise emission at the source, related to **traffic management**. Among them, the most common one is the traffic speed limitation that is significantly effective provided the traffic fluidity is preserved. For instance, examples have been shown of the beneficial effect on noise exposure of chicanes, traffic calming devices, speed limits and after the transformation of a traditional crossing into a roundabout.

Actions on noise propagation

- The most common tool for road traffic noise reduction is the construction of noise barriers. The principle is to erect an earth berm or a wall between the source (the road) and the receiver (exposed building) to prevent sound from propagating. The sound wave is not totally stopped due to possible sound transmission through the structure and essentially diffraction effect on the top and on the edge of the obstacle. An acoustical “shadow zone” is created behind the barrier where noise levels are substantially lowered. Effective noise barriers can reduce noise levels by as much as 12 dB(A) but only at specific locations. It becomes less efficient at longer distance behind the barrier, at higher levels and at locations close to the edges. The main parameter defining the efficiency of the barrier is the size (height and length). The material is in principle sufficiently dense to provide enough sound insulation so that sound transmission is negligible compared to diffraction. The material facing the traffic can be sound absorbent in order to avoid sound reflection on the opposite side of the road.
- When noise source protection measures or barrier construction are impossible or not sufficient, the ultimate solution for noise abatement is the improvement of façade insulation of exposed buildings. This usually consists in improving glazing, windows, and air inlets of exposed façades. This solution is often used when other solutions are not technically possible, or would be too expensive (for instance when only a few buildings are to be protected), or in the case of several noise sources at different locations (several roads, railway, factory...). This solution is relatively easy to implement. The disadvantage is that only inner areas are protected and the efficiency is null when windows are open.
- Actions on urban planning must also be cited among the protections measures against road noise, although the opportunities where application is possible are rare. But in case acousticians are involved sufficiently early in the urban planning project, several “tricks” can be applied to avoid a useless exposition of façades to road noise. For instance, offices and other activity buildings can be placed close to the road so that they shelter the residential buildings; new buildings can be oriented in such a way that a minimal surface of façade is exposed to the road noise.

Sharing knowledge on road noise management

Road traffic noise problems are acute in many countries in the world. However, if concerns are similar, situations, legislations, management practices are different. Under these conditions, sharing knowledge and experience can bring a significant step forward to raise awareness and to possibly improve the practice for road noise mitigation.

In Europe, the Conference of European Directors of Roads (CEDR) appointed a working group on “noise” in 2006-2007, with objective to facilitate knowledge sharing on noise management and abatement issues among the European national road administrations. The group carried out a survey questionnaire and reported the analysis in a comprehensive report in May 2008 [12]. Various issues

were considered, including noise regulations, integration of noise in road maintenance, noise abatement measures, communication of noise related matters to the public. The study noted that despite many regulations, noise limits, or guidelines exist they are not easily comparable due to different indicators and different calculation models. Furthermore, although the noise reducing pavements are available on the market in 80% of the EU member states, the noise criteria is almost never used in the pavement management system. A number of recommendations for good governance regarding noise management and abatement were made.

In the meantime, a similar questionnaire was circulated with European countries in the frame of the “TYROSAFE” EU-project [13]. This questionnaire focused on the way road surface properties are considered in policies or regulations regarding all road networks, not only noise properties but also skid resistance and rolling resistance, whereas the questionnaire of CEDR concentrated on national road network and noise only. One of the outcomes was that despite many EU members are willing to implement a classification system of road surfaces, despite a European consortium have proposed a classification scheme (“SILVIA” [14]), there is a total lack of common procedure that would help the circulation of products through the European market. Furthermore, it was acknowledged that noise requirements are compatible with those on safety and energy saving.

Another survey was made by the World Road Association PIARC within worldwide Road Authorities in 2010 [15]. Questions were asked about the concerns on potential impact of (rural/urban; new/existing) road noise, on road noise related policies/legal requirements/best practices, on road pavement-specific issues associated with noise that need more work. Only twelve countries provided answers, out of which nine European countries. The study showed that concerns about road noise are mainly driven by health related issues, although economical reasons were also mentioned. Many of these countries have developed legal requirements or targets in terms of road noise levels. In general, they have set up an exhaustive legal frame for road noise mitigation, including legal noise limits for new roads, regulations on minimum sound insulation for new building, classification of noisy roads, development of transportation noise monitoring centres, identification of “hot spots”. Remedial measures to eliminate road noise hot spots are also organised in some countries. Among the pavement specific issues, convergent needs were expressed for more research on a better understanding of the life span and durability of low noise road surfaces. A specific interest was also expressed in the development of low noise dense surfaces for urban areas and of silent surfaces with low rolling resistance.

CONCLUSION ON THE CONTRIBUTION OF THE ROAD SURFACE TO ROAD NOISE ABATEMENT

Because tyre-road noise is the dominant source for vehicles above relatively low speed (around 30 km/h for passenger cars and 50 km/h for trucks), road surface characteristics play a capital role in the road noise emission. Low noise road surfaces significantly and beneficially reduce road traffic noise in addition to other abatement measures, such as tyre or vehicle noise limitation, speed reduction and noise barriers. A wide range of low noise road surfaces have been developed over the past decades

But it seems that further development of low noise road surfaces at the European scale is limited by the lack of common procedures for the qualification and the assessment of noise properties of road surfaces. If acoustic measurement methods and classification systems already exist in some countries in Europe, they are neither harmonised nor comparable. Noise labelling of road surfaces would be

useful for three applications: (1) for the guidance of decision-makers when planning pavement construction or renewal, (2) for the evaluation of correction terms in calculations, for instance in the context of strategic noise mapping or action planning as required in the Directive 2002/49/EC and (3) for contractual specifications in tender documents for pavement construction or renewal.

Finally, further research is needed to better mitigate the durability of noise properties of road surface and to developed optimised surfaces for noise and other surface properties such as skidding resistance, rolling resistance and mechanical resistance.

REFERENCES

- [1] WHO, Night noise guidelines for Europe, World Health Organization – Regional office for Europe, 2009 (<http://www.euro.who.int/en/what-we-publish/abstracts/night-noise-guidelines-for-europe>)
- [2] Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council relating to the assessment and management of environmental noise, 25 June 2002.
- [3] Kephelopoulos S., Gergely B., Anfosso-Lédée F., Paviotti M., Common Noise Assessment Methods in EU: CNOSSOS-EU - Part I: The road map. *Internoise 2010*, Lisbon, Portugal, 2010.
- [4] WHO, *Burden of disease from environmental noise- Quantification of healthy life years lost in Europe*, World Health Organization – Regional office for Europe and EC-JRC, 2011 (<http://www.euro.who.int/en/what-we-publish/abstracts/burden-of-disease-from-environmental-noise.-quantification-of-healthy-life-years-lost-in-europe>)
- [5] L.C. den Boer, A. Schrotten, *Traffic noise reduction in Europe - Health effects, social costs and technical and policy options to reduce road and rail traffic noise*, CE Delft, 2007 (http://www.transportenvironment.org/docs/Publications/2008/2008-02_traffic_noise_ce_delft_report.pdf)
- [6] EEA, *Transport at a crossroads - TERM 2008: indicators tracking transport and environment in the European Union*, Report No 3/2009, European Environment Agency, 2009
- [7] EC, Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the implementation of the Environmental Noise Directive in accordance with Article 11 of Directive 2002/49/EC, European Commission, June 2011 (<http://ec.europa.eu/environment/noise/home.htm>)
- [8] Tyre/Road Noise Reference Book, Sandberg, U., Ejsmont, J. A. (2002) (<http://www.informex.info>)
- [9] Council Directive 70/157/EEC of 6 February 1970 on the approximation of the laws of the Member States relating to the permissible sound level and the exhaust system of motor vehicles (<http://ec.europa.eu/environment/noise/sources.htm>)
- [10] Directive 2001/43/EC of the European Parliament and of the Council of 27 June 2001 amending Council Directive 92/23/EEC relating to tyres for motor vehicles and their trailers and to their fitting. (<http://ec.europa.eu/environment/noise/sources.htm>)
- [11] Future Noise Policy. European Commission. Green Paper. 1996 (<http://ec.europa.eu/environment/noise>)
- [12] Knowledge Sharing on Noise Management and Abatement, CEDR report Conférence Européenne des Directeurs des Routes (Conference of European Road Directors), may 2008 (<http://www.cedr.fr>).
- [13] P. Nitsche, R. Spielhofer, “Report on policies and standards concerning skid resistance, rolling resistance and noise emissions”, TYROSAFE project Deliverable D06, 2009 (<http://tyrosafe.fehrl.org/>)
- [14] Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces, FEHRL Report 2006/02, as part of the “SILVIA – Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control” EU FP5 Project.
- [15] Road noise mitigation – state of the art, PIARC report, to be published 2012.

TIRE-ROAD NOISE: A STATE OF AFFAIRS¹

Luc Goubert
Belgian Road Research centre

INTRODUCTION

Tyre/road noise is an important contributor to traffic noise. Even at speeds as low as 30 - 40 km/h it plays an important role, at least for cars. This means that traffic noise abatement is nowadays basically the abatement of tyre/road noise. This document aims to explain the reader how traffic noise is generated and how it can be reduced.

Main sources of noise from a motor vehicle

The sources of noise from a vehicle can be classified into two major categories: noise sources conditioned by engine operation and noise sources conditioned by the vehicle speed. This results in a noise composed of several sources which combine with each other (see Table 1 and Figure 1). The predominance of one source over another is closely linked to the speed of the vehicle.

Tab. 1. Main sources of noise from a motor vehicle.

Noise source	Type of noise source	Comments
Engine noise	Noise source linked to engine operating conditions	Noise from this source is often referred to as “power train noise” or “propulsion noise”.
Tyre/road noise	Noise source linked to speed	
Noise radiated by vibrations and shocks in vehicle parts		
Aerodynamic noise		

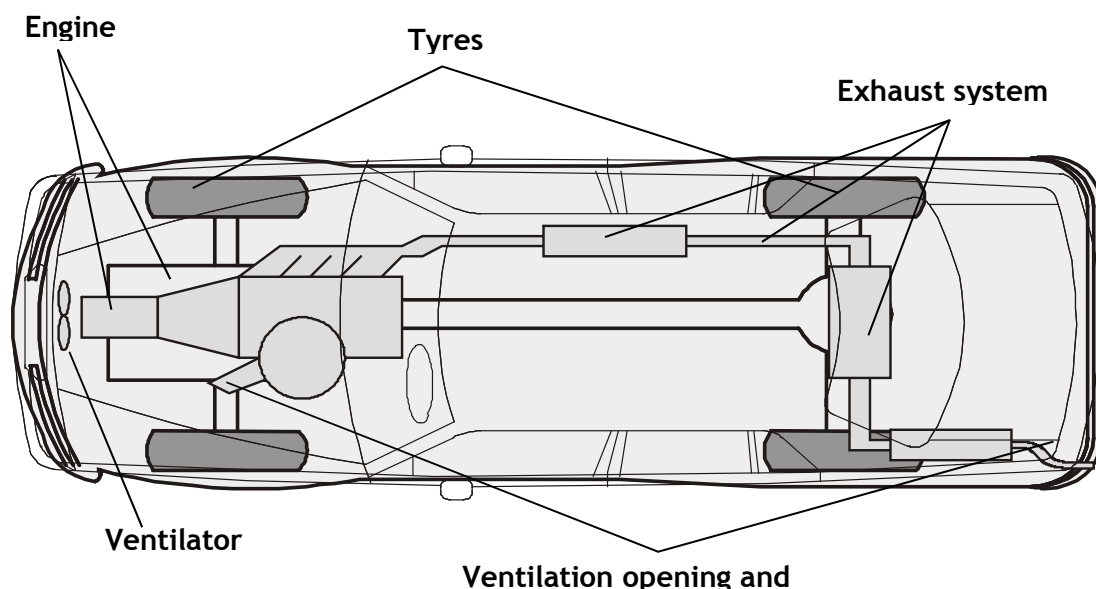


Fig. 1. Sources of noise from a motor vehicle.

¹ The document is largely based on the document “Etat des lieux des performances acoustiques des revêtements de chaussées”, Dossier technique et pédagogique, Bruitparif (Observatoire du bruit en île-de-France), december 2011, to which the author has contributed. See www.bruitparif.fr

Engine noise

This noise source is linked to the operation conditions of the engine of the vehicle. It involves:

- the power train (engine, air inlet and exhaust system);
- the cooling ventilator and the transmission system (gearbox and rear axle).

By way of illustration, Figure 2 shows the noise level produced by a motor vehicle versus the operating conditions of its engine.

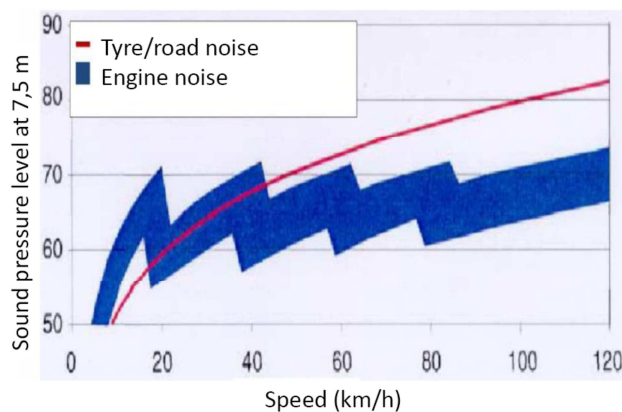


Fig. 2. Engine noise versus engine operating conditions, with discontinuities due to gear shifts.

Over the past twenty years, vehicle manufacturers have succeeded in reducing power train noise considerably: engine, exhaust and transmission systems for passenger cars and lorries. These improvements are particularly important for lorries. The progress achieved has been prompted by increasing requirements in European regulations. One has set threshold values for noise emission by a vehicle in the process of type approval before it is commercialized on the European market.

Tyre/road noise

This noise source is linked to the travel speed of the vehicle. It depends on:

- the type of tyre (material, structure, tread pattern, width, inflation pressure, wear...);
- the texture of the road surface;
- the sound absorption of the road;
- the mechanical impedance (elasticity) of the pavement;
- weather conditions (wetness, temperature).

In general, at travel speeds higher than 30 km/h for light vehicles and 40-60 km/h for heavy vehicles, the noise generated by the contact between the tyre and the road is predominating. The various components of tyre/road contact noise are discussed in detail in Section 3 of this document.

Aerodynamic noise

Aerodynamic noise is due to air turbulence. At usual vehicle travel speeds, aerodynamic noise remains relatively low with respect to the other sources of noise from the vehicle.

Noise radiated by vibrations and shocks in vehicle parts

Vibrations and shocks between various parts (body of the vehicle, etc.) due to deficiencies of the road (mainly unevenness) generate sound radiation from the structure of the vehicle – especially for heavy vehicles.

Total vehicle noise

In new vehicles manufacturers have succeeded to reduce noise levels produced by the power train considerably. As a result, tyre/road contact noise has become predominant at speeds from 30-40 km/h onwards for light vehicles and 50-60 km/h onwards for heavy vehicles, as stated before. This is illustrated by the simplified model implemented in the Netherlands [1] for predicting road noise generated by light and heavy vehicles (see Figure 3).

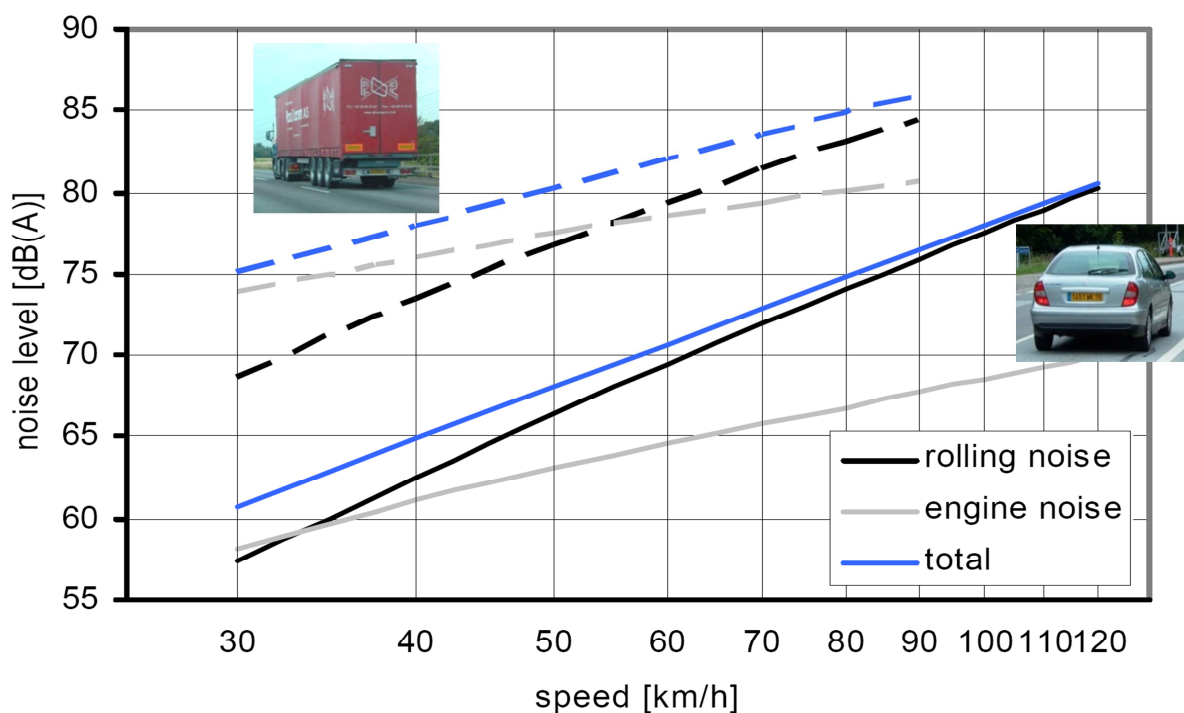


Fig. 3. Contributions of engine noise and tyre/road noise (light and heavy vehicles) [2].

In this simplified theoretical model, tyre/road noise becomes predominant over engine noise at speeds:

- at 35 km/h for light vehicles (solid line);
- and at 55 km/h for heavy vehicles (dotted line).

Tyre/road noise increases more sharply with speed than power train noise. For light vehicles, although the predominating contribution of tyre/road noise to the total vehicle noise has been a known phenomenon at high speeds, its substantial presence in the range of speeds travelled in urban areas (< 50 km/h) opens up new horizons for action. In this respect, it is considered at the European level that it is possible to control noise from light vehicles in urban areas by acting on tyre/road noise, more specifically on tyre and road surface characteristics.

It seems, therefore, that it may be interesting to act on tyre/road contact noise both at limited speeds in urban areas as well as at high speeds on arterial roads. This means that there is a major interest in using low-noise road surfaces. By way of illustration, Table 2 briefly presents ways of reducing the levels of the main sources of noise from light vehicles.

Tab. 2. Means of reducing noise from a motor vehicle.

Light vehicle speed	Predominating source(s) of noise from the vehicle	Ways of action
< 30 km/h	Power train noise	Management of accelerations and engine operation conditions by the driver
		Hybrid engine
		Electric engine
> 30 km/h and < 50 km/h	Tyre/road noise and power train noise	Quieter tyres
		Quieter road surface
		Driver behaviour
		Hybrid engine
> 50 km/h	Tyre/road noise	Quieter tyres
		Quieter road surface (greater impact for electric vehicles)

TYRE/ROAD NOISE

To reduce tyre/road noise considerably, it is necessary to understand the physical mechanisms involved in the generation of it [3]. Various phenomena have been identified to be at the origin of tyre/road noise, such as vibrations in tyres, air pumping, and the horn effect. The main mechanisms involved in sound propagation and, more specifically, in sound absorption phenomena are explained as well.

Reducing noise by an appropriate choice of road surface type is the major concern in this contribution.

Tyre vibrations

When a tyre rolls on a surface which is not perfectly smooth, irregularities will induce vibrations in the tyre tread and indirectly in the walls of the tyre. Sound radiation from these vibrations significantly contributes to the production of tyre/road noise. This factor gains importance with increasing irregularities (within a specific range of horizontal dimensions) of the road surface (see Figures 4 to 5).

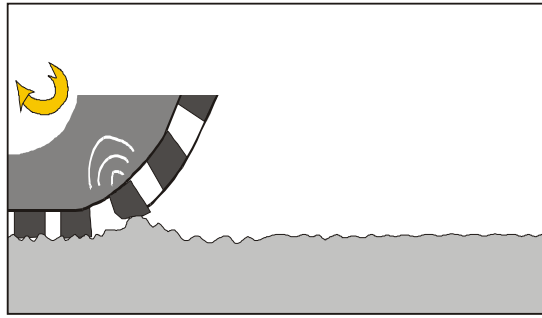


Fig. 4. Noise due to tyre vibrations: impact of tyre tread on irregularities causes the tyre tread to vibrate.

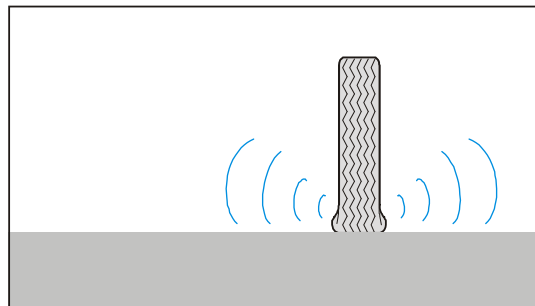


Fig. 5. Noise due to tyre vibrations: the side walls of the tyre start to vibrate as well as they are coupled with the vibrating tyre tread.

Only irregularities which are deep and wide enough (typically larger than 1 cm in horizontal size) cause vibrations, whereas those smaller than 1 cm cause almost none and are on the contrary beneficial for the acoustic performance of the pavement, as they suppress air pumping. Tyre vibrations are maximized when the road surface exhibits irregularities with horizontal dimensions around 8 cm approximately, equal to the size of the contact area with the tyre. Setts, blocks or tiles which have these dimensions are intrinsically noisy and should therefore be avoided if one wants to limit the traffic noise. They have been known to generate noise levels that are at least 6 dB(A) higher than conventional road surfaces.

Vibrations in tyres generate noise in the low frequency range (approximately 80 to 1,250 Hz), depending on the speed and mass of the vehicle. Noise as perceived inside a car is, therefore, greatly affected by the presence of these larger irregularities (see further).

Other effects related to the interaction between the tyres and the road surface may take place, but they are minor. The succession of adhesion and release phenomena – also referred to as “stick-slip” – between tyre rubber and road aggregates in the contact area generates high-frequency noise (squealing). These phenomena are connected with shocks in tyre tread elements, which may result in the emission of rather high-frequent sounds (above 1,250 Hz) and, in extreme cases, may cause the tyre to “squeal” in bends. Also worth mentioning is the “stick-snap” phenomenon, which may produce quite shrill sounds (with frequencies exceeding 1,250 Hz) when the grip of the tyre on the road is too strong (this may occur for example when driving on a freshly laid asphalt pavement).

Air pumping

A tyre rolling on a smooth surface produces noise as the air trapped between the tyre and the non-interconnected voids is compressed and then suddenly released. The “air pumping” phenomenon, which dominates sound emission in the high frequency range (approximately 1 to 5 kHz), is stronger as the tyre/road contact area is larger. It is not observed – or greatly reduced – on a surface with small asperities (typically smaller than 1 cm in height) or with good porosity, as these allow easier circulation of air (see Figures 6 and 7)

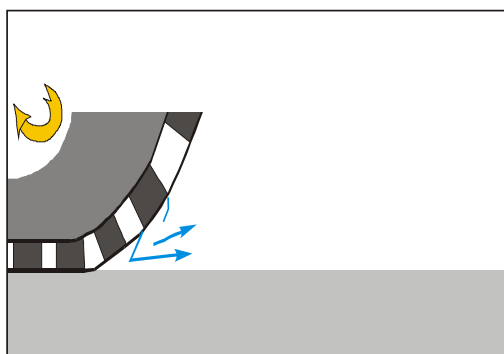


Fig. 6. Noise due to air pumping: compression of air at the leading edge tyre/road contact zone.

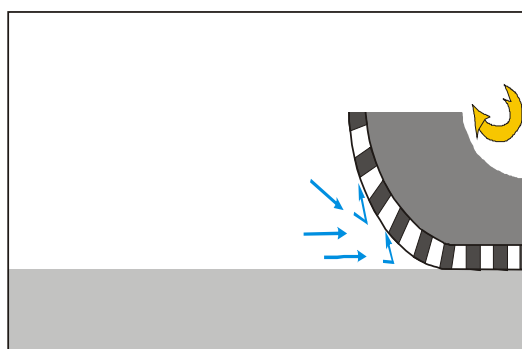


Fig. 7. Noise due to air pumping: suction of air at the rear end of the tyre/road contact zone.

The air present in the tyre tread elements is then able to freely escape between the asperities or the voids at the time of the contact with the road, which reduces the compression effect.

Small-sized asperities can generally be obtained by using small aggregates in the surface course (e.g., a small-graded asphalt mixture). They should be homogeneous (avoid accumulations of aggregates), but must not form a regular pattern (no equally spaced grooves), which would produce wining. As a general rule, it is advisable to have sufficiently deep asperities (at least 0.5 mm of texture depth) homogeneously distributed in a dense and small to medium-graded pattern (maximum 10 mm). Porosity is linked with the presence of surface voids that are connected with the voids in the structure of the surface course (minimum 15 to 20 % of voids, e.g. like in porous asphalt).

The horn effect

This mechanism does not produce noise by itself, but amplifies the noise generated by other phenomena. Sounds can reverberate several times in the air horn (or conical space) formed by the tyre

and the road surface, which results in intensifying them (see Figure 8). The principle is similar to that experienced with a megaphone or a trumpet e.g.. The amplification mainly occurs in the most audible frequency range (1 to 3 kHz). The effect is produced by successive reflections of sound waves in the conical space formed by the tyre and the road surface, on close-graded road surfaces in the front or at the rear of the wheel. On open-graded or porous pavements, the amplifying effect is at least partly mitigated by sound absorption in the voids.

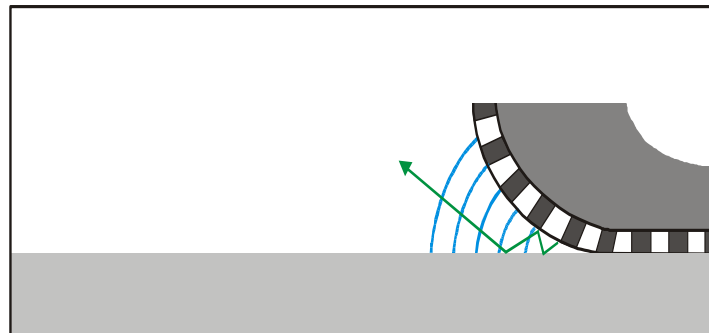


Fig. 8. Sound amplification by the horn effect.

Noise absorption

Road surfaces have a capability of absorbing sounds which depends greatly on their porosity. Interconnected voids in a surface course absorb not only tyre/road contact noise, but also engine noise. This is particularly of interest at low speeds in urban areas, where engine noise is predominant. To be effective in absorbing noise, the porous surface course must have a minimum thickness of 40 mm and a minimum voids content of 20 %. The voids must be connected to the atmosphere.

Figure 9 shows a typical graph of sound absorption coefficient versus frequency for a road surface with an excellent performance of sound absorption (porous asphalt concrete, denoted as “PA” – see further).

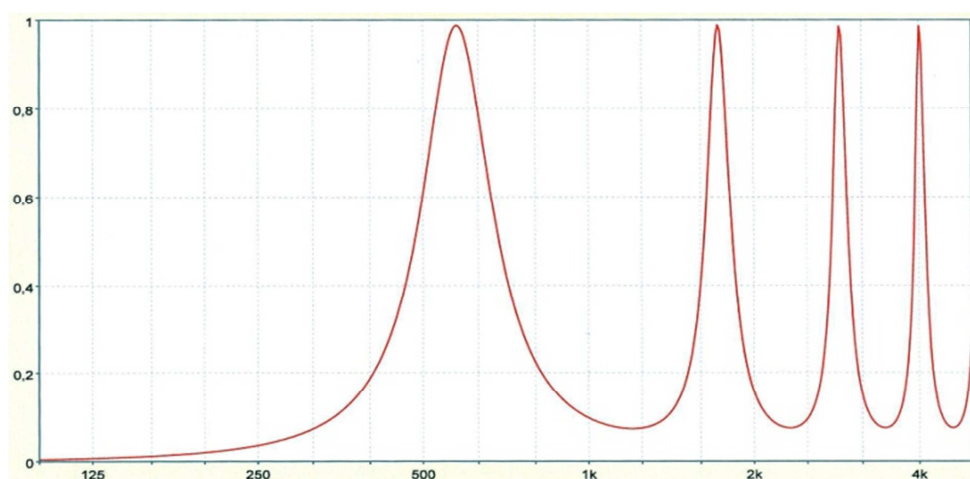


Fig. 9. Sound absorption coefficient vs. frequency.

The closer the coefficient to 1, the higher the sound absorption capacity of the road surface in the concerned frequency range. In the example presented, sound absorption is high at frequencies of about 550; 1,800; 3,000 and 4000 Hz.

The succession of absorption peaks and “valleys” is peculiar to a porous, granular material. The optimization process aims at “adapting” the first absorption peak in the low frequency range of the sound spectrum of the vehicle (around 500 Hz). More specifically, it is tried to obtain absorption peaks as high and wide as possible, so as to improve the absorptive properties of the road surface. The horizontal position, the height and the width of the first absorption peak is of particular relevance for the absorbing capacity of a porous road surface. The position is related to the thickness of the porous layer. The height and the width of the peak are related with the void content and the shape of the voids.

Synthesis

Table 3, extracted from a Swiss report [4] on low-noise pavements in built-up areas, presents a synthesis of the various mechanisms involved in the production and propagation of tyre/road contact noise. The aggregate effect of these mechanisms is referred to as tyre/road contact noise.

Tab. 3. Various mechanisms involved in the production and propagation of tyre/road contact noise.

	Effect	Frequency	Significance
Mechanical impulses	Impulses given to the tyres by contact between the texture of the road surface and the elements in the tyre tread.	Depends on speed, but always lower than 1,250 Hz	+++
	Stick-slip: shocks in the tyre tread elements. Audible in extreme cases as “squealing” in bends.	High: > 1,250 Hz	+
	Stick-snap: adhesion between the tyre tread and the road.	High: > 1,250 Hz	+
Aerodynamic impulses	Air pumping: compression followed by sudden release of air trapped between the tyres and non-interconnected voids in the road.	High: > 1,250 Hz	++
Sound amplification	Horn effect: successive reflections of a sound wave in the conical area formed by the tyre and the road, which results in amplifying the sound.	1-3 kHz	+ ?
Sound absorption (acoustic)	Interconnected voids in the surface course absorb not only tyre/road contact noise, but also engine noise. This effect is more marked as the road surface is more permeable.	Absorption depends on layer thickness, void content and shape	+++

The representation made of, and weight given to each of the mechanisms vary from one author to another. The SILVIA research programme [5] has resulted in proposing a simplified model: “*It is reckoned that for standard rolling conditions tyre/road noise is mainly composed of “impacts and*

shocks” noise and “air pumping” noise, with the first mainly occurring below 1,000 Hz and the second mainly occurring above 1,000 Hz.”

ROAD SURFACE CHARACTERISTICS AFFECTING TYRE/ROAD CONTACT NOISE

Irregularities (i.e. deviations from the perfect plane) in a road surface directly condition its acoustic performance, to such an extent that models have been developed for predicting noise from road surface characteristics. Two parameters have a strong influence on noise level: the texture and the (positive or negative) “relief” of the road surface. In developing “low-noise” road surfaces, researchers must, however, assess the impact of their efforts on all performance parameters, to avoid achieving acoustic benefits at the expense of e.g. a poor skid resistance and hence a reduced safety.

Surface texture

The texture of a road surface is characterized by the distribution, the sizes and the various depths of the irregularities in its surface. Irregularities in a road surface are generally measured with a laser profilometer. Using a Fourier transform, two dimensional profiles measured with a profilometer are then used to calculate a texture spectrum (amplitudes as a function of texture wavelengths). The texture spectrum contains information on both the depth of the irregularities as characterized by their amplitude (vertical dimension) and the lengths of the irregularities as represented by their wavelength (horizontal dimension).

To allow easier characterization of a road surface, the range of wavelengths associated with surface irregularities has been divided into four classes of texture. These classes correspond to different scales of observation defined by the following ranges of wavelengths (L) [6]:

- microtexture: horizontal dimension of irregularities $L < 0.5$ mm;
- macrotecture: horizontal dimension of irregularities $0.5 \text{ mm} < L < 50$ mm;
- megatecture: horizontal dimension of irregularities $50 \text{ mm} < L < 500$ mm;
- unevenness: horizontal dimension of irregularities $L > 500$ mm.

Figure 10 illustrates the influence of texture wavelengths on performance characteristics of the road surface such as rolling resistance, skid resistance, and tyre/road contact noise. It appears to be important to master texture wavelengths in the macro and megatecture range, i.e., $0.5 \text{ mm} < L < 500$ mm, with a view to controlling:

- tyre/road contact noise;
- skid resistance;
- rolling resistance.

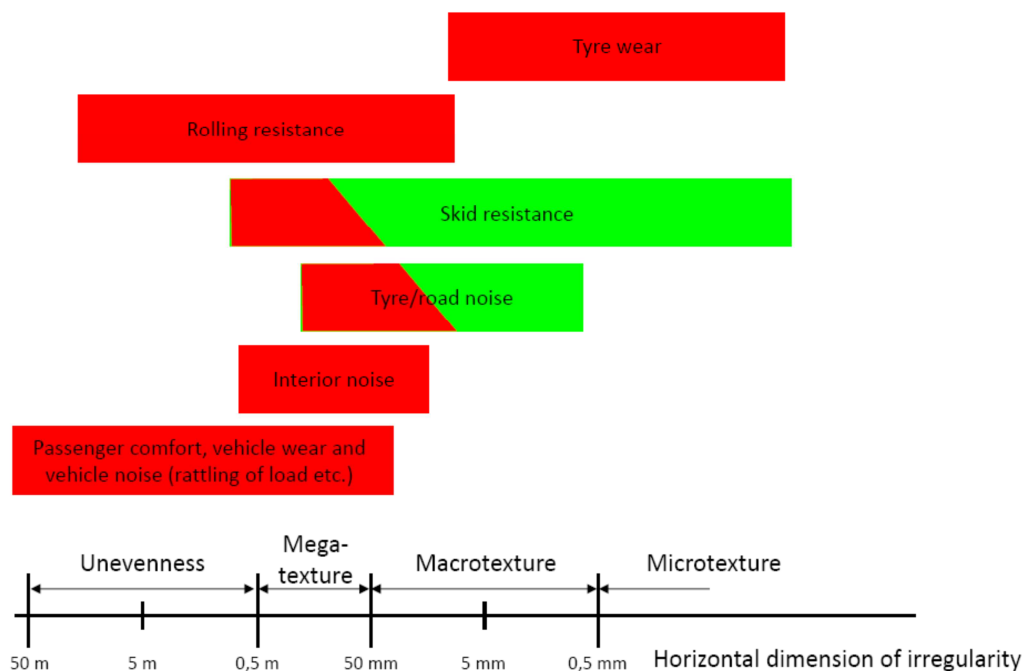


Fig. 10. Classes of irregularities in a road surface: influence of surface texture on road surface characteristics (noise, skid resistance and rolling resistance).

The amplitudes of irregularities in the megatexture range must be kept as low as possible. This can be achieved by a homogeneous distribution of components:

- aggregates should be uniformly sized and firmly wedged against one another;
- non-cubical aggregates should be pushed into a flat position by compaction with a smooth roller;
- the underlying layer must have an even thickness during compaction, to avoid the formation of megatexture.

In practice, megatexture can:

- take the form of a defect resulting from an error made in laying the surface course. One example are the undulations sometimes observed in the surface of a concrete pavement. These irregularities are due to the vibrations of the transverse screed used to smooth the fresh concrete. This screed is subjected to vibrations in order to compact the concrete;
- appear with time, owing to wear or as a sign of fatigue in the surface course;
- be created by inhomogeneous macrotexture. This may be the result, for example, of coarse aggregates segregating from the mixture at the surface of a coarse-graded bituminous layer;
- be intrinsic to certain types of road surfaces, often in combination with little or inexistent macrotexture. Concrete paving blocks are among the road surfaces with intrinsic megatexture and reduced macrotexture. Porphyry cobblestones exhibit intrinsic megatexture as well, but have almost no macrotexture; this makes this pavement both noisy and slippery.

Surface relief

Surface relief is an essential property of road surfaces which is not included in texture spectra. When tyre/road contact noise is produced, a marked difference can be heard between a concave-shaped surface (with a so-called positive texture) and a convex-shaped surface (with a so-called negative texture). Negative textures are preferable (see Figure 11).

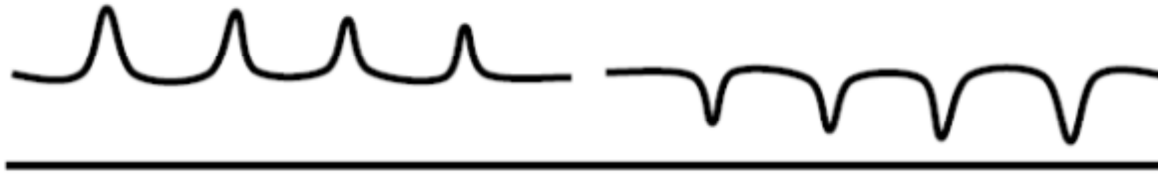


Fig. 11. Identical texture spectra with different acoustic properties: one positive (left), the other negative (right).
Porosity

Together with permeability, porosity is the most important and best controlled factor in determining the absorptive capacity of a road surface. Porosity describes the content of interconnected voids in the surface course of a road. Non-interconnected voids do not contribute to sound absorption. In contrast with their “porous” counterparts, road surface courses with few and/or isolated voids are referred to as “dense”. The SILVIA research programme [7] has identified four major groups of road surfaces by volumes of interconnected air voids present:

- dense (4 – 9 %);
- semi-dense (9 – 14 %);
- semi-open (14 – 19 %);
- open (or porous) (> 19 %).

Noise abatement by open road surfaces is based on several factors:

- air pumping is reduced as the permeability of the road surface course allows easier air flow and prevents air pressure from building up in the tyre/road contact area;
- sounds lose part of their acoustic energy during each of the successive reflections between the vehicle and the road;
- sound absorption during the propagation process is the most important factor. The virtual elimination of the horn effect is a direct consequence of this.

A specific advantage of open or porous road surfaces is that their effectiveness increases over long distances, since their absorbing properties then have more space to act (successive interactions between sounds and the road surface). An approaching vehicle generates a much shorter noise peak on an absorbing road surface than on a dense one. A difference of 2-3 dB in favour of the absorbing road surface has been measured at a distance of 10 m from the source.

Viscoelastic behaviour

The viscoelastic behaviour of a road surface can be an important factor in abating noise. Noise reduction can be very considerable if the surface course has an elasticity comparable to that of the tyres themselves.

In the SILENCE project tests were made with surface courses incorporating rubber granules. The extra reduction in tyre/road noise due to the presence of these granules was estimated at approximately 1 dB(A) [8].

“Poroelastic” road surfaces are an example of an interesting development, as they combine the properties of viscoelastic road surfaces with those of porous road surfaces. Their noise-abating potential ranges between 7 and 12 dB(A) with respect to dense asphalt concrete, which is unequalled. These road surfaces are described in more detail further.

Wetness on the road surface

The presence of water on a dense road surface may affect noise production considerably. A study [3] has shown that water present on a dense road surface causes a larger increase in noise at low speed. The amount of water present on a porous road surface plays a smaller part. Another study [9] has revealed a change in absorption characteristics on open or porous road surfaces. The absorption peak shifts to lower frequencies and is lower as the amount of water in the voids increases. The influence of the road surface was analysed by the Belgian Road Research Centre as well. As far as noise production is concerned, it seems that the impact of water present on a road surface greatly depends on the texture of that surface. On grooved cement concrete or on porous asphalt (PA), water hardly causes any increase in sound level. The reverse has been observed on mastic asphalt, which generates a markedly higher noise level. Sandberg and Ejsmont^{vii} have reported approximate values reflecting the influence of moisture on dense asphalt concrete, which depend upon the amount of water on the road surface and upon vehicle speed (see Table 4 and Figure 12).

Tab. 4. Approximate values reflecting the influence of moisture on dense asphalt concrete, depending upon the amount of water present on the road surface and upon vehicle speed.

Amount of water on the road surface	0-60 km/h	61-80 km/h	81-130 km/h
Dry	reference	reference	reference
Moist (drizzle)	+ 2 dB(A)	+ 1 dB(A)	+ 0 dB(A)
Wet (moderate rain)	+ 4 dB(A)	+ 3 dB(A)	+ 2 dB(A)
Wet (heavy rain)	+ 6 dB(A)	+ 4 dB(A)	+ 3 dB(A)

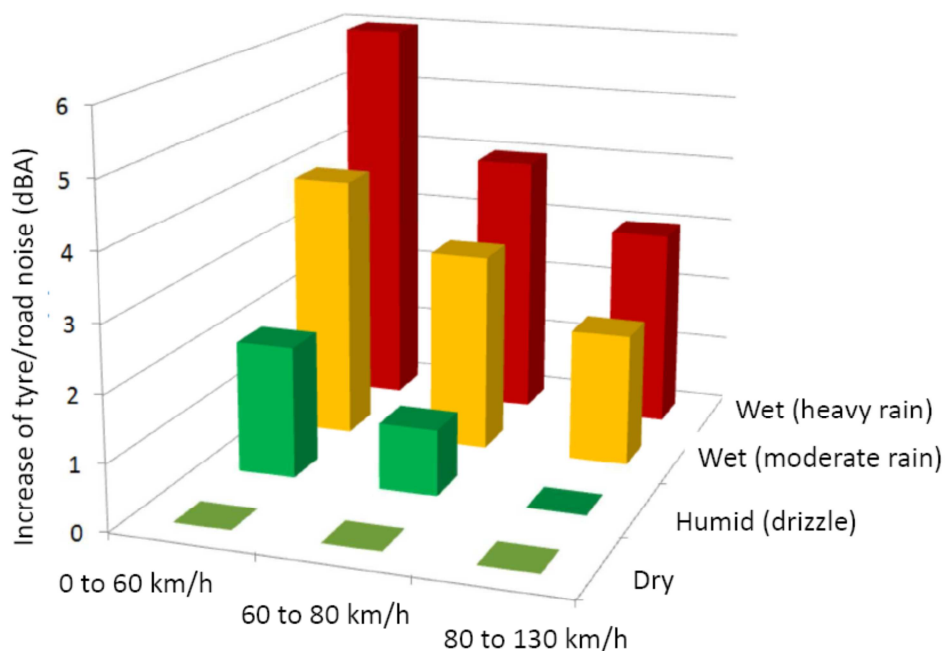


Fig. 12. Approximate values reflecting the influence of moisture on dense asphalt concrete, depending upon the amount of water present on the road surface and upon vehicle speed.

HOW TO DESIGN A LOW-NOISE PAVEMENT?

Reduction of aggregate size

Macrotexture can, above all, be influenced by the choice of aggregate sizes. A strong trend to reduce aggregate size has been observed for low-noise road surfaces, especially very thin asphalt concretes (Microlayers). The size of the coarsest aggregate is generally 4 to 6 mm. In several studies, sizes 2/4 and 3/4 have been recommended for chipping mastic asphalt, see e.g. [10].

The same study has identified a marked trend to develop thin-layer road surfaces. The initial objective was based on the limited amounts of materials required for their construction: the smaller the maximum aggregate size, the thinner the layers can be made. This makes such road surfaces both financially attractive and easier to renovate when they have reached the limit of their acoustic life. On the other hand, this approach requires the use of a tack coat with a markedly higher quality.

The use of smaller-sized aggregates is also attended by a significant decreasing trend in tyre/road contact noise.

Incorporation of elastomers

Tests have been made with several experimental types of asphalt concrete while replacing part of the aggregates with rubber particles or adding rubber powder to the mixture, but only a minor noise reduction (see Figure 13) has been observed (one up to 2 dB(A)) [11].

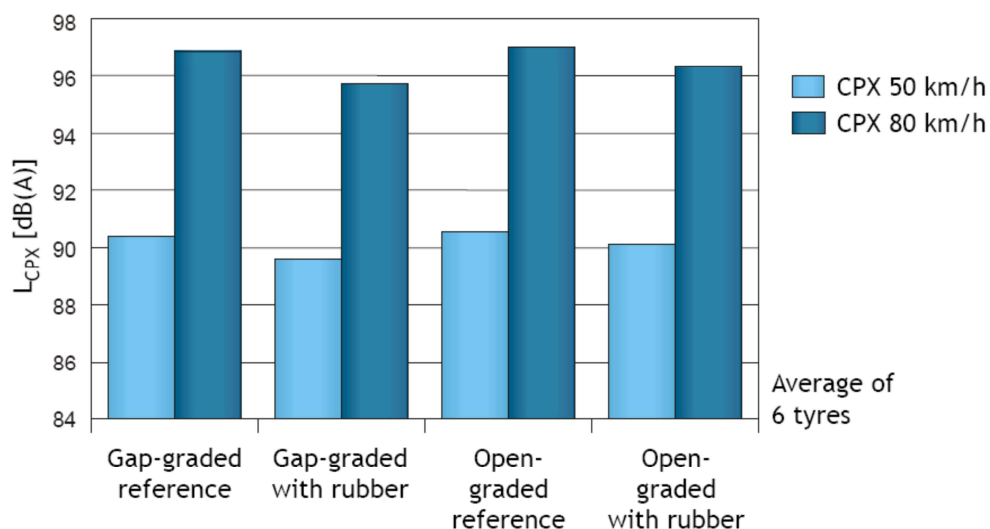
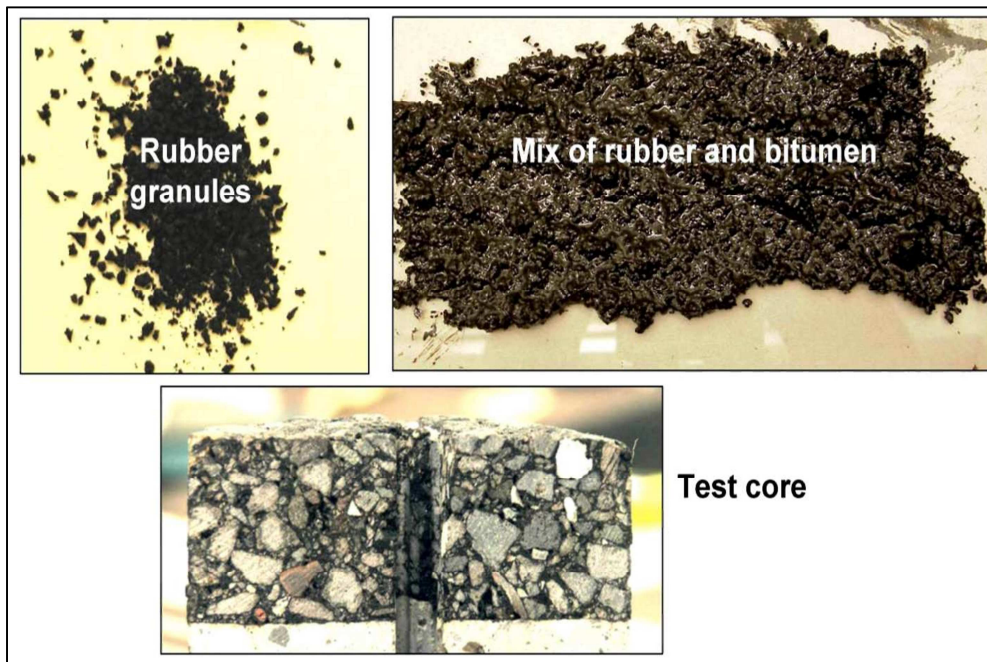


Fig. 13. Addition of rubber powder to bitumen and the effect of it on the acoustic performance of gap and open graded asphalt concrete.

On the other hand, major reductions have been measured on road surfaces essentially composed of rubber, such as poroelastic road surfaces [12]. However, these types are still in the experimental stage and quite a few problems remain to be solved: fire resistance, roughness in rainy weather, ravelling resistance and adhesion to the underlying layer.

Expected gains

Table 5 reviews the road surface parameters which make it possible to reduce tyre/road contact noise [10].

Tab. 5. Influence of road surface parameters that affect noise.

Parameters	Description, measures	Noise-reducing potential
Microtexture	No smooth surfaces, use angular mineral materials.	1-3 dB(A) Smooth surface in comparison to fine-graded Microlayers
Macrottexture	Design the road surface as to attain high amplitudes for texture wavelengths between 1 and 10 mm, and low amplitudes for wavelengths between 16 and 50 mm. The optimum aggregate size is 3 mm for light vehicles and 5 mm for heavy vehicles.	2-3 dB(A) Maximum gain with 3 mm, in comparison to 8 mm
Megattexture	Amplitudes as small as possible.	?
Surface with a negative texture	Compacted surfaces with a negative (convex) texture are better than chipped surfaces with a positive (concave) texture.	3-5 dB(A) Smooth surface in comparison to a chipped surface
Porosity and permeability	Open or porous road surfaces absorbing both tyre/road and engine noise.	About 4 dB(A) in comparison to a low-noise dense surface
Poroelasticity	The road surfaces being tested contain 40-95 % of added rubber and 25-40 % of voids.	7-12 dB(A)

Designing a “low-noise” road surface

In their reference book [3], Sandberg and Ejsmont define a “low-noise road surface” as a “road surface which, when interacting with a rolling tyre, influences vehicle noise in such a way as to cause at least 3 dB(A) (half power) lower vehicle noise than that obtained on conventional and most common road surfaces”. A few elementary rules for the design of a “low-noise” road surface can be derived from the preceding sections. Developments to improve acoustic performance mainly involve the characteristics that have a significant effect on tyre/road noise:

- the road surface should have a homogeneous structure and as few large-sized irregularities as possible, to avoid vibration phenomena in tyres;
- roller-compacted surfaces are significantly quieter than chipped surfaces;
- the road surface should not be smooth, but rather exhibit a sufficient amount of asperities of a small size (< 10 mm) in the horizontal direction. Grading should be fine, if possible finer than 8 mm. The ideal is to have a grading from 3 to 5 mm. An open texture (with little sand) eases air circulation and consequently reduces the air pumping effect;
- the road surface must also have adequate porosity (high content of interconnected voids) to ensure good sound-absorbing capacity (abatement of noise generated by aerodynamic air pumping phenomena);
- road surfaces with good viscoelastic properties make it possible to damp tyre vibrations, thus absorbing noise mechanically;
- the underlying layers should have adequate stability: although tyre/road noise is due to the contact between the tyres and the surface course, the underlying layers also play a very important part in avoiding noise annoyance. If the pavement base is unstable, the surface course will soon crack and fragment, which will result in excessive tyre/road noise.

Furthermore, other factors may be considered to ensure lasting acoustic performance:

- using a special filler with high stiffening power in the pavement helps to prevent thermally or mechanically induced plastic deformations;
- using binders with high cohesive power in the surface course helps to prevent stripping of aggregate and, hence, to maintain surface roughness with time.

Suitable solutions for each physical phenomenon participating in tyre/road contact noise are available. Details on those allowing significant reductions in vibration and air pumping phenomena and in the horn effect are presented in the next few sections.

Reduction of vibrations

To reduce noise-generating vibrations, major asperities and irregularities in the road surface must be reduced. This can be achieved by using smaller-sized aggregates in the surface course and by taking precautions in laying and maintenance. Surface asperities larger than 1 mm of width (macrotexture range, up to 50 mm) and surface irregularities of a large size in the horizontal direction (larger than 50 mm, typically in the megatexture range) are the major causes of vibrations. The smaller the number and depth of macro-irregularities and mega-irregularities, the more the vibration phenomenon is mitigated.

Using smaller aggregates in the surface course (Figure 14) makes it possible to reduce the horizontal dimension of macro-irregularities and, consequently, to reduce vibrations in tyres. To prevent mega-irregularities generating vibrations in tyres and vehicle bodies, block, sett or tile paving must be avoided. Errors in construction can also be at the origin of mega-irregularities. The undulations which are observed rather frequently in concrete surfaces are due to poor smoothing of the wet concrete and are a typical example of this kind of error. Mega-irregularities can also originate in wear phenomena: depressions, cracks ... hence the importance of providing good maintenance and regular upkeep of the road. The shape of the surface relief also plays an important part. Compacted surfaces with a negative texture should be preferred, as they reduce vibrations in comparison to chipped surfaces with a positive texture.

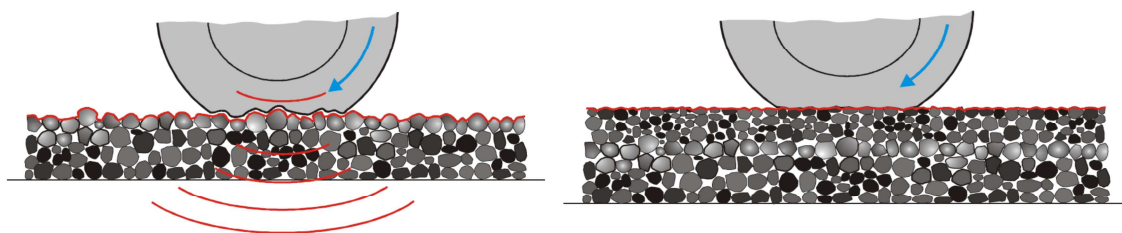


Fig. 14. The coarser aggregate in the top layer of a single PA (left hand side) yields more megatexture which causes more tyre vibrations and tyre/road noise when compared to the fine aggregate in the top layer of the two layer porous asphalt (right hand side).

Damping of vibrations

Damping reduces the amplitude of vibrations. The damping properties of a road surface can be somewhat improved by a specific composition of the binder (e.g., polymers) and/or by adding elastomers (like rubber).

Mitigation of air pumping

A significant reduction in noise associated with air pumping can be achieved by increasing the small asperities (reducing the size of aggregates) in the road surface and/or increasing the porosity of the surface course.

Macrotexture is generally obtained by using small aggregates at the surface. Fine-graded asphalt mixtures thus make it possible to strongly reduce noise produced by the compression/release of trapped air. The air pumping effect is also mitigated by using draining surface courses with holes in the surface that are connected with the voids in the bulk of the course (minimum 15 % of voids). Air is then evacuated and aspirated vertically in a quiet way, *through* the holes in the surface.

Mitigation of the horn effect

A reduction of this amplification phenomenon can be achieved by improving the absorptive properties of the road surface. This amounts to increasing the porosity of the road surface so as to create interconnected air interstices (using gap grading).

In addition, the draining or porous characteristics of a road surface make it possible to absorb tyre/road noise; sound energy is partly converted to heat in the voids. Moreover, they make it possible to reduce the extra noise generated by splash and spray when it is raining or just after rain. Finally, good sound absorption also helps to abate engine noise (which is predominant at low speeds).

SOME COMMONLY USED AND LOW-NOISE PAVEMENTS

Dense Asphalt Concrete (DAC)

Dense asphalt concrete was and is a commonly used pavement type in lots of European countries and abroad. They are made from a mixture with filler, sand, aggregates with a typical maximum size of typically 11, 14, 16 or 20 mm and bitumen as binder. There are and must be some voids in this pavement, typically 5 – 8 %, but these are generally not interconnected nor connected to the surface and hence do not play any acoustic role. The advantage is the price, the reasonable durability (typically 12 up to 15 years, depending on the traffic) and the generally reasonable acoustic performance. A major disadvantage is the sensitivity to rutting and the danger of aquaplaning for high speed traffic. One can improve the rutting resistance by adding certain polymers to the bitumen (PmB). In Belgium, the risk for aquaplaning was reduced by the embedment of chippings in the hot asphalt. This technique was also used in other EU countries (like the UK) and the USA. It improves safety and durability, but creates a very noisy pavement. In most countries DAC is used as a *reference surface* to assess the acoustic quality of other pavements and it is not considered itself as a low-noise pavement.

Cement Concrete Pavements

Cement concrete can be extremely durable: typically 20 – 30 years, but there are examples of concrete pavements lasting 80 years or more. The skid resistance is generally very good and concrete pavements on high speed roads were used to get a surface treatment to improve the high speed skid resistance, often making them much noisier. Examples of such traditional surface treatments are transversal or longitudinal grinding of the hardened concrete or the combing, brushing or burlapping of the wet concrete.

Not only these surface treatments gave cement concrete a rather bad reputation with respect to noise, but also common “mistakes” in the construction did not help:

- The creation of “undulations” in the concrete by the use of a traditional transversal compacting screed. The wavelength was in the order of 10 to 20 cm, hence right in the acoustically highly unfavourable megatexture range (Figure 15);
- The presence of a steel reinforcement grid, too close to the concrete surface can create a vague pattern with humps in the megatexture range;
- One used traditionally concrete slabs with a length of 20 – 25 m. To allow thermal dilatation, one had to leave joints of a few cm, leading to extra “shock” noise when these joints were overrun by tyres. The problem became worse as the slabs tended to subside with respect to each other, forming “steps” (Figure 16);



Fig. 15. Laying of a cement concrete surface with a classic screed, perpendicular to the road axis, leading to the quite common undulations, making the pavement extremely noisy.



Fig. 16. Level difference between two non dowelled concrete slabs.

Porous asphalt (PA)

To produce porous asphalt, one leaves basically the sand and a part of the filler fraction out of the mixture and one uses aggregates with all more or less the same size. In this way, one creates voids between the stones in the pavement and the void content is typically 20 – 25 %. These voids are generally interconnected and also connected to the air, creating irregular canals leading from the top to the bottom of the wearing course. Sound waves falling on a PA penetrate in these channels and are only partially reflected, as a part of the acoustic energy is transformed into heat. This effect accounts for a noise reduction of typically 2 up to 3 dB(A) [13]. PA is typically applied with a layer thickness of 40 mm and one has to use aggregates which are not too small to allow proper compaction (typically 10 to 14 mm maximum chipping size) (see Figure 17 and 18).



Fig. 17. Single layer porous asphalt (0/14).



Fig. 18. Two layer porous asphalt with a 4/8 top layer (25 mm thick) and a 0/16 porous sub layer (45 mm thick).

This “large” aggregate at the surface of the PA layer creates some megatexture, causing tyre vibrations and hence counteracting the noise reducing action of the absorption. PA was originally developed in the WW II for its draining capacities by the US Army to be used on landing strips. In the eighties one started to use the concept for its noise reducing capacities. PA is nowadays applied on highways in some countries, e.g. in the Netherlands it is even mandatory by law to use it on highways. Besides the noise reduction, it has the additional advantage that it prevents the formation of a water film on the pavement when it rains. This improves visibility as there’s much less splash and spray. Moreover at night one does not have the annoying glare of the head lights of vehicles approaching from the other

direction. PA has the inconveniences that it is less durable (more sensitive to raveling) and that its winter maintenance is more difficult. More deicing salt is needed to remove the ice from the pores. It is not recommended to apply PA on low speed roads or on roads with a low traffic volume, as the pores tend to clog. Sufficient high speed traffic has an auto-cleaning effect and the loss of noise reduction due to clogging is then limited to about 0,5 dB(A)/year. In the other cases it can be up to three times as high.

To overcome the problem of the unfavourable texture of the conventional PA, one has developed in the Netherlands in the beginning of the 1990ties the *two-layer PA*. The two-layer PA consists of two porous layers made with different stone sizes. The lower layer has typically a thickness of 45 mm and is made with large aggregates (14 or 16 mm). On top of this, one puts a thinner layer (25 mm) with smaller aggregates (2/4, 2/6 or 4/8). The total thickness of the porous layer is hence 70 mm and the top has a fine texture with little megatexture. The noise reduction is typically 5 dB(A), but can initially be up to 7 dB(A). Two layer PA yields the highest noise reduction of all “classic” low-noise pavements. Inconveniences are the high price and the limited lifetime (on average about 9 years in the Netherlands). The pavement is especially sensitive to raveling and it has the same problem with clogging as conventional, single layer PA. Originally it was believed that the upper porous layer would act as a filter and prevent dirt to penetrate in the voids, but experiments with two layer porous asphalt on urban roads in the Netherlands and Denmark have shown that this doesn’t work. On high speed roads with sufficient traffic volume, two-layer PA performs well.

Thin asphalt layers

Thin asphalt layers can be defined as all asphalt layers made with a homogeneous, plant produced bituminous mixture and with a layer thickness between 10 and 30 mm (see Figure 19 to 21). A very comprehensive study about thin asphalt layers was carried out in the OPTHINAL project in the frame of ERANET ROAD. The two deliverables of this project contain almost all knowledge available so far about this pavement type [14]. The development of the modern thin asphalt layers started in France in 1986 with the birth of Novachip, a thin layer which was applied in a layer thickness of 12 – 20 mm with a stone size of 0/8 or 0/11. In the beginning of the 1990ies several other types came on the market, especially in France and in the Netherlands. The development was supported by the need for a cheaper alternative for porous asphalt. As it is thinner, less material is required. There are nowadays at least 40 types of thin asphalt layers on the market, porous and non-porous types, with varying stone sizes, grading curves, binder types and thicknesses. The precise compositions are often company secret. Thin layers are noise reducing, typically 3 up to 5 dB(A), mainly due to their optimized texture. The porosity plays only a minor role, as the sound absorption is only in the higher frequencies of the spectrum (above 2000 Hz) whereas the main part of the tyre/road noise is situated in the frequency range 500 – 2000 Hz. For some products, very high noise reductions are claimed by the manufacturer, which would be due to the elasticity of the thin asphalt layer. The main advantages are the price, the generally high skid resistance and - according to recent research - low rolling resistance [15]. Main disadvantages are the higher susceptibility to raveling and debonding. Thin layers resist less good to shearing forces (e.g. on crossings). The laying process of thin layers is also more sensitive to unfavourable weather conditions. Nevertheless, thin asphalt layers are very recommendable to apply on streets and roads in urban and non-urban environment as a cheap measure to reduce noise on a short term.



Fig. 19. Example of a thin asphalt layer with the brand name “Microflex[®]”.



Fig. 20. Example of a thin asphalt layer with the brand name “Novachip[®]”.

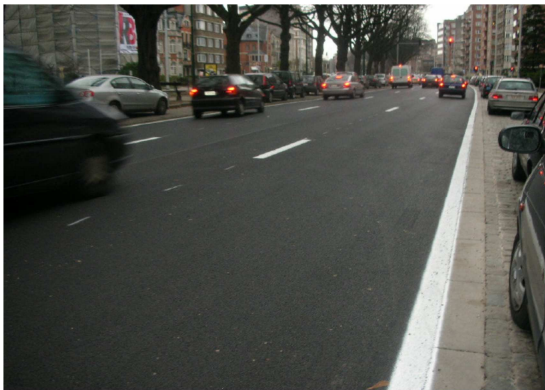


Fig. 21. Example of a thin asphalt layer type in a Brussels street, called “Microville[®]”.

Exposed Aggregate Cement Concrete (EACC)

No solid scientific evidence has so far been presented that cement concrete is “intrinsically” noisier than bituminous pavements because it is “harder”. Differences in noisiness seem to be due to texture differences. It is more difficult to get a good texture from an acoustic point of view with cement concrete as it is not “roller compacted” as bituminous pavements. In order to improve the acoustic quality of concrete pavements one developed in the last decades of the 20th century techniques to obtain a better texture: a homogeneous, non periodic macrot texture and a minimal megat texture. One achieved a significant improvement with the following techniques:

- Use of the *super-smoother* instead of a transversal compaction screed (see Figure 22). The super-smoother is oriented parallelly with the road axis and makes turning movements, avoiding the formation of undulations in the wet cement concrete;



Fig. 22. The “super-smoother”, used for the smoothing of wet cement concrete making circular movements parallelly to the road axis, althuss avoiding undulations in the cement concrete surface.

- Use of small, high quality aggregates in the whole cement concrete layer or only in the top layer (see Figure 23);



Fig. 23. A hardened two layer exposed aggregate cement concrete surface with 0/7 aggregate in the top layer.

- The use of the technique of chemical washing: a retarding agent (basically sugar water) is sprayed on the wet cement concrete which is subsequently covered with a canvas (see Figure 24). The agent prevents the cement to harden at the surface. After 12 to 24 h, the canvas is removed and the unhardened cement (a few mm thick) is removed with a brush and/or a water jet;



Fig. 24. “Chemical washing” of cement concrete: immediately after the laying of the concrete, a retarder is sprayed on it and it is covered with a plastic foil (left hand side). The unhardened cement of the upper layer is removed after 12 – 24 h with a brush and water (right hand side).

- The use of continuously reinforced concrete instead of separate slabs (see Figure 25).



Fig. 25. A steel grid for the reinforcement of a new cement concrete highway in Belgium.

Although these techniques yield concrete pavements with far better acoustic properties than the classic ones, they cannot be considered as low-noise pavements. A technique several times used in Belgium the last year is the two layer EACC: one applies the concrete in two layers and for the top layer one only uses high quality aggregate with a small size (typical 7 mm) instead of the conventional 14 mm. With this two-layer EACC one can reach a similar acoustic performance as DAC. The single layer EACC is typically 2 dB(A) noisier than DAC.

CONCLUSION

In the case of passenger cars, the tyre/road noise is dominant for a large speed range. For lorries it plays a significant role as well. A variety of noise generation mechanisms contribute to tyre/road noise: tyre vibrations, air pumping and the horn effect. These mechanisms can be suppressed successfully by adapting the surface properties of the pavement. Rough texture (megatexture) should be avoided and fine texture (macrotexture) or voids should be foreseen to reduce air pumping. The tyre/road noise can be further diminished by making the road surface porous. The poro-elastic pavement is a promising concept to create ultra quiet pavements in the near future.

Thin asphalt layers have an optimized texture and are a cheap way of abating traffic noise. Porous asphalt pavements partly absorb the noise, but the voids tend to clog, gradually reducing the absorption capacity. New techniques have been developed to construct concrete pavement with acceptable acoustic properties.

REFERENCES

- [1] IPG, "Inventory study of basic knowledge on tyre/road noise", Dutch Innovation Programme on noise mitigation, DWW-2005-022 (2005).
- [2] Graph by Hans Bendtsen, Danish Road Directorate, Fløng, Denmark.
- [3] Sandberg, U.; Ejsmont, J.A. "Tyre/Road Noise Reference Book". INFORMEX, SE-59040 Kisa, Sweden (2002) (www.informex.info).
- [4] "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités", OFROU/OFEV, rapports de synthèse 2003, 2007 & rapport annuel 2009.

- [5] European project SILVIA (Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control), "Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces", "Integration of Low-Noise Pavements with other Noise Abatement Measures", "Safety Aspects Related to Low Noise Road Surfaces", " Traffic Management and Noise Reducing Pavements ", FEHRL, 2006.
- [6] ISO 13473-2 and -3.
- [7] European project SILVIA (Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control), "Guidance Manual for the Implementation of Low-Noise Road Surfaces", "Integration of Low-Noise Pavements with other Noise Abatement Measures", "Safety Aspects Related to Low Noise Road Surfaces", " Traffic Management and Noise Reducing Pavements ", FEHRL, 2006.
- [8] Descornet, G. "Low-noise urban road surfaces", European SILENCE project, BRRC (2008).
- [9] Shima, E. A., "The effect of rain on the noise reduction of porous asphalt pavement", Proceedings of the INTERNOISE conference, Yokohama (1994).
- [10] "Revêtements de routes peu bruyants à l'intérieur des localités", OFROU/OFEV, rapports de synthèse 2003, 2007 & rapport annuel 2009.
- [11] Ripke, O.; Andersen, B.; Bendtsen, H.; Sandberg, U. "Report of promising new road surfaces for testing" deliverable F.D4 of the SILENCE project (2005), downloadable from www.silence-ip.org.
- [12] Sandberg, U., Goubert, L., Biligiri, K. and Kalman, B. "State-of-the-Art regarding poroelastic road surfaces", Deliverable D8.1 of the PERSUADE project (February 2010), see <http://persuade.fehrl.org>.
- [13] Eijbersen, M. e.a. "Publicatie 287: Stille Wegdekken", CROW (June 2010), see www.crow.nl.
- [14] Kragh, J.(ed.); Nielsen, E.; Olesen, E.; Goubert, L.; Vansteenkiste, S.; De Visscher, J.; Sandberg, U.; Karlsson R. "OPHTHINAL - Optimization of Thin Asphalt Layers - Final Report" ERANET ROAD, Brussels (March 2011) and Sandberg, U. (ed.); Kragh, J.; Goubert, L., Bendtsen, H., Bergiers, A.; Biligiri K.P.; Karlsson, R.; Nielsen, E.; Olesen, E.; Vansteenkiste, S. "OPHTHINAL - Optimization of Thin Asphalt Layers – State-of-the-Art Review", ERANET ROAD, Brussels (August 2010), both reports can be downloaded for free from http://www.brcc.be/ocw/n15/n15_02i4.php.
- [15] Bergiers, A. e.a. "Comparison of Rolling Resistance Measuring Equipment - Pilot Study", MIRIAM project deliverable (December 2011), downloadable from <http://miriam-co2.net/>.

CARACTERIZAÇÃO DO RUÍDO PNEU-PAVIMENTO NAS ESTRADAS PORTUGUESAS

Elisabete Freitas

Pedro Machado

Isaac Raimundo

Universidade do Minho, C-TAC, efreitas@civil.uminho.pt

RESUMO

As políticas de controlo do ruído implementadas a partir dos anos 80 levaram as administrações rodoviárias e os construtores a aplicarem medidas de mitigação do ruído. Porém, apenas recentemente essas políticas cotemplam a redução do ruído na fonte, o que obriga à avaliação da qualidade dos pavimentos no que respeita ao ruído, tal como acontece com outros parâmetros. Este trabalho apresenta os métodos essenciais e complementares que contribuem para uma gestão eficaz do ruído rodoviário e aplica-os a um vasto conjunto de superfícies. Deste modo, foram utilizados 3 métodos de avaliação, aplicados em 17 locais. Como principal resultado tem-se a avaliação da contribuição de cada tipo de superfície para o ruído rodoviário, o que permitirá no futuro apoiar decisões e definir estratégias de redução do ruído. Conjuntamente são apontados alguns problemas que resultaram da aplicação de cada método às condições portuguesas.

Palavras chave: Ruído pneu-pavimento, método CPX, método CPB, método SPB, absorção sonora.

INTRODUÇÃO

O ruído resultante do contacto pneu/pavimento é determinante no ruído total produzido pelos veículos a velocidades superiores a 40-50 km/h para veículos ligeiros (Sandberg & Ejsmont, 2002). Sendo esta a principal fonte de ruído rodoviário, a atuação na superfície do pavimento e também nos pneus é fundamental. De facto, apenas nos últimos anos se tem considerado a utilização de superfícies de baixo ruído como uma medida de mitigação do ruído rodoviário. As administrações rodoviárias têm recorrido a camadas de desgaste em betão betuminoso drenante, em autoestradas, e em mistura betuminosas aberta ou rugosa com betume modificado com borracha, em autoestradas, em estradas nacionais e municipais.

O desempenho deste tipo de camadas foi brevemente abordado no nosso país em quatro estudos. Em dois desses estudos foi comparada uma mistura betuminosa aberta com betume modificado com borracha com um betão de cimento armado contínuo (Ruivo, 2004 a)) e depois com um betão betuminoso rugoso (Ruivo, 2004 b)). O terceiro aborda novamente uma mistura com betume modificado com borracha (Gomes & Seixas, 2006) e num quarto estudo foi comparado o nível máximo de ruído medido numa camada em betão betuminoso drenante e outra em betão betuminoso “convencional” considerando as superfícies secas e molhadas (Freitas *et al.*, 2009).

Apesar deste esforço, a caracterização do desempenho a nível acústico das camadas superficiais dos pavimentos utilizados em Portugal está muito incompleta. Foi neste cenário que se desenvolveu o

projeto NOISELESS - *Percepção, modelação e redução do ruído através de superfícies de pavimentos inovadoras e duráveis.*

Neste trabalho apresenta-se uma parte dos resultados desse projeto, onde se expõe e analisa os resultados da caracterização do ruído em diversas superfícies de pavimentos rodoviários, obtidos por vários métodos de avaliação do ruído pneu-pavimento.

MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DO ruído pneu-pavimento

Para a avaliação do ruído de contacto pneu-pavimento foram propostos diversos métodos. Entre os métodos mais utilizados destacam-se os seguintes:

- Método da proximidade imediata (Close ProXimity method, CPX) (ISO CD 11819-2, 2000);
- Método estatístico de passagem (Statistical Pass-By method, SPB) (ISO 11819-1: 1997); e
- Método de passagem controlada (Controlled Pass-By method, CPB).

Como o ruído pneu-pavimento é influenciado por vários fatores, nomeadamente pelo comportamento dos condutores (através do controlo da velocidade e da pressão dos pneus), pelas características dos pneus (estrutura, dimensão, rigidez da borracha, relevo, desgaste e idade), pelas características da superfície do pavimento (macro e megatextura, irregularidade, porosidade, rigidez, idade, desgaste e presença de água) e pelo clima (temperatura e vento) deve complementar-se a avaliação do ruído com outros ensaios de caracterização da superfície como é o caso da textura e da absorção sonora.

A seguir faz-se uma breve descrição dos métodos de avaliação do ruído e algumas considerações sobre a textura e a absorção sonora.

Método estatístico de passagem

O método SPB baseia-se na medição dos níveis máximos de pressão sonora, ponderada A, pela passagem de um número considerável de veículos com significado estatístico de diversas categorias, num trecho específico da estrada para as velocidades de circulação recomendadas (ISO 11819-1: 1997).

Para esta medição, o microfone deverá estar localizado a $1,2 \text{ m} \pm 0,1 \text{ m}$ acima do plano da faixa de rodagem e a 7,5 m da linha central da via de tráfego. Assim, a cada passagem individual de um veículo, o nível sonoro (máximo) e a velocidade do veículo são registados. Os níveis de ruído dos veículos de cada categoria são adicionados, assumindo determinadas proporções por categoria, para fornecer um único "índice" que constitua o resultado final. Este índice é designado por Índice Estatístico de Passagem (SPBI) e pode ser usado na comparação da camada superficial de pavimentos rodoviários, de modo a que a sua influência no nível de ruído de um fluxo de tráfego misto possa ser determinada. A variabilidade da composição do tráfego é frequentemente um entrave à aplicação integral deste método, pelo que muitas vezes se compara diretamente os níveis de ruído a diferentes níveis de velocidade obtidos em pavimentos diferentes e considerando uma única categoria de veículos.

As principais desvantagens deste método referem-se à área de ensaio requerida sem a presença de objetos susceptíveis de introduzem reflexões e à sua aplicabilidade em estradas com elevado volume de tráfego.

Método de passagem controlada

O método CPB difere do método SPB apenas no que respeita aos veículos. Neste caso os veículos são selecionados em vez de serem os de passagem corrente na estrada. As restantes condições, como a velocidade, o tipo de pneu, a mudança engrenada no veículo e o número de passagens, são controladas

Método da proximidade imediata

A medição do ruído pelo método CPX pode ser realizada de duas formas: (i) utilizando um atrelado normalizado (puxado por um veículo comum) onde são colocados pneus de ensaio e pelo menos dois microfones junto do pneu ou, alternativamente, (ii) os microfones são colocados junto a uma roda do próprio veículo. O esquema de montagem dos microfones deve estar de acordo com o definido na norma ISO CD 11819-2:2000.

Considerações sobre a absorção sonora

Algumas características da superfície do pavimento, tais como a espessura da camada, a resistividade (que pode ser determinada indiretamente pela granulometria), a porosidade e a tortuosidade influenciam a absorção sonora. O ângulo de incidência das ondas sonoras sobre a superfície também influencia esta característica. Para se alcançar a redução máxima de ruído produzido pelo tráfego é importante ajustar-se as propriedades da superfície da estrada que determinam a absorção de som com as características da composição de tráfego. A medição da absorção sonora é fundamental na fase de concepção para otimizar esta característica do material (Blokland & Roovers, 2005) e na fase de exploração para avaliar o desempenho acústico ao longo do tempo.

Considerações sobre a textura do pavimento

A textura do pavimento é um dos fatores que determina a geração do ruído pneu-pavimento, particularmente nas gamas da macrotextura e da megatextura (Sandberg & Ejsmont, 2002).

Em comprimentos de onda entre 10 mm e 500 mm (macro e megatextura), o ruído aumenta significativamente à medida que a amplitude da textura neste intervalo aumenta. O mecanismo principal de ruído está relacionado com o impacto do perfil do pneu, o que tende a dar origem a ruído em frequências abaixo dos 1000 Hz. Em comprimentos de onda entre aproximadamente 0,5 mm e 10 mm (macrotextura), o ruído do tráfego diminui com a amplitude da textura, particularmente em frequências superiores a 1000 Hz. Neste caso, a textura diminui o bombeamento de ar pelo pneu, o que contribui para reduzir a geração de ruído aerodinâmico.

Porém, a textura é medida no âmbito da avaliação da qualidade dos pavimentos através do indicador da macrotextura Profundidade Média do Perfil, que não trata a textura em termos de amplitude e frequência.

MÉTODOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para a medição do ruído contacto pneu-pavimento foram utilizados dois métodos, o método CPX e o método CPB. A Figura 1a) mostra a configuração de montagem dos microfones utilizada no método CPX. Neste caso utilizou-se um atrelado onde o sistema foi adaptado, o que minimiza a interferência

do ruído do motor nas medições efetuadas. O pneu de ensaio é o AVON V4 de acordo com o recomendado (Morgan *et al.*, 2009).

A escolha do método CPB que, para além do ruído gerado junto à roda considera também o efeito do pavimento na sua propagação, tem por principal vantagem um maior controlo do ensaio no que respeita às velocidades praticadas, acelerações/desacelerações indesejadas e estado dos pneus. Por outro lado, pode não representar totalmente as características do tráfego. Na Figura 1b) mostra-se a configuração do ensaio e o equipamento usado. Os veículos selecionados foram 3 veículos ligeiros considerados representativos da frota portuguesa. Os ensaios foram realizados nos dois métodos a velocidades compreendidas entre 30 km/h e 100 km/h. A temperatura do ar e da superfície e a velocidade do vento foram registadas.

Para a medição de absorção, foi usado um tubo de impedância auto-fabricado com 80 mm de diâmetro, de acordo com o apresentado em Freitas *et al.* (2010). A principal característica deste tubo é a extremidade aberta que é colocada sobre a superfície a ser avaliada (Fig. 1c)). O coeficiente de absorção é calculado em função da impedância acústica ao longo de um intervalo de frequência de 250 Hz a 2,5 kHz (1/3 de oitava).

Para a medição da textura foi utilizado um perfilómetro laser instalado num veículo (Figura 1b) que permite determinar a profundidade média do perfil (MPD), neste caso a cada 10 m ao longo de cada secção de 200 m. Em condições particulares de funcionamento, este equipamento permite ainda obter informação necessária para a determinação do nível de textura em função da frequência espacial.

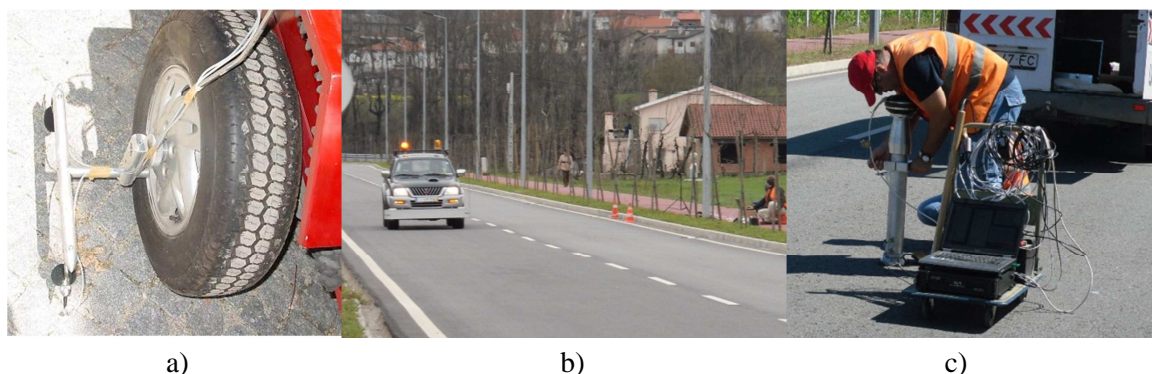


Fig. 1. Detalhes dos ensaios de avaliação do desempenho: a) configuração de montagem dos microfones em atrelado; b) ensaio pelo método CPB; c) ensaio de absorção em campo.

O ruído é influenciado pelas condições climatéricas no momento da sua medição. Embora seja possível medir-se o ruído de contacto pneu-pavimento com a superfície molhada, isto só deve acontecer em situações de estudo específicas. Por sua vez, quando a velocidade do vento é superior a 5 m/s não se deve fazer a medição ou considerar o resultado (ISO 11819-1: 1997). Quanto à temperatura, é possível ajustar-se o ruído medido tendo em conta uma temperatura de referência, em função do tipo de camada utilizando. Por exemplo, a metodologia recomendada em Anfosso-Lédée, F. & Pichaud, Y. (2007). Neste estudo não foram feitas correções por não terem sido validadas ainda as expressões existentes.

CARACTERIZAÇÃO DAS SECÇÕES DE ESTUDO E ENSAIOS REALIZADOS

Para a caracterização do ruído de contacto pneu-pavimento foi selecionado um conjunto de 13 pavimentos cujas camadas superficiais cobrem em grande parte este tipo de camadas. Na Tabela 1 apresenta-se a descrição do material de cada camada e a correspondente designação no estudo, para distinguir secções com o mesmo tipo de material e secções que foram observadas mais do que uma vez, sendo tratadas neste caso de forma independente. Assinala-se ainda no Quadro 1 os ensaios que foram realizados em cada camada.

Pelas razões expostas anteriormente, deu-se preferência ao ensaio CPB, sendo que o mesmo não foi possível adotar-se em estradas de volume de tráfego muito elevado ou onde se praticam velocidades elevadas, como é o caso das autoestradas. Além disso, nas estradas com estas características não foi possível por razões de segurança realizar-se ensaios pontuais como é o caso da absorção.

Tab. 1. Descrição do material que caracteriza a camada superficial do pavimento e sua designação e ensaios realizadas em cada uma delas.

Descrição do material	Designação da camada	SPB	CPB	Absorção	Textura
Microbetão Betuminoso (MBR7)	S1		X	X	X
Mistura Betuminosa Aberta com Borracha (média % de borracha) (MBA BMBm)	S2	X	X	X	X
Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com Borracha (MBA BMB12)	S3	X	X	X	X
Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com Borracha (MBA BMB10)	S4	X	X	X	X
Betão Betuminoso Denso (BD16)	S5	X	X	X	X
Betão Betuminoso Denso (BD16)	S6		X	X	X
Microaglomerado (McB)	S7		X	X	X
Cubos de Granito (CG)	S8		X		-
Mistura Betuminosa Aberta com Betume Modificado com Borracha (MBA BMB10)	S9		X		X
Betão betuminoso drenante (BDr)	S10	X			X
Betão betuminoso rugoso (BBr)	S11	X			X
Betão Betuminoso Rugoso (BBR12)	S12		X		X
Microaglomerado (McB)	S13		X		X
Microaglomerado Duplo (MAD8)	S14	X			X
Mistura delgada (aberta) (MDa6)	S15		X		X
Mistura delgada (fechada) (MDf6)	S16		X		X
Betão Betuminoso Denso (BD12)	S17		X		X

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Método CPX

Na Figura 2 apresenta-se os níveis de ruído medidos de acordo com o método CPX para velocidades entre os 40 km/h e os 80 km/h. Estes valores correspondem à média dos níveis de ruído medidos por trechos de 10 m ao longo de cada secção de 200 m. Devido a questões de segurança em alguns locais não foi possível atingir-se a velocidade de 90 km/h.

Nas secções observadas, os níveis de ruído obtidos têm diferenças de cerca de 1.5 dB(A) a 50 km/h e de 3.3 dB(A) a 80 km/h.

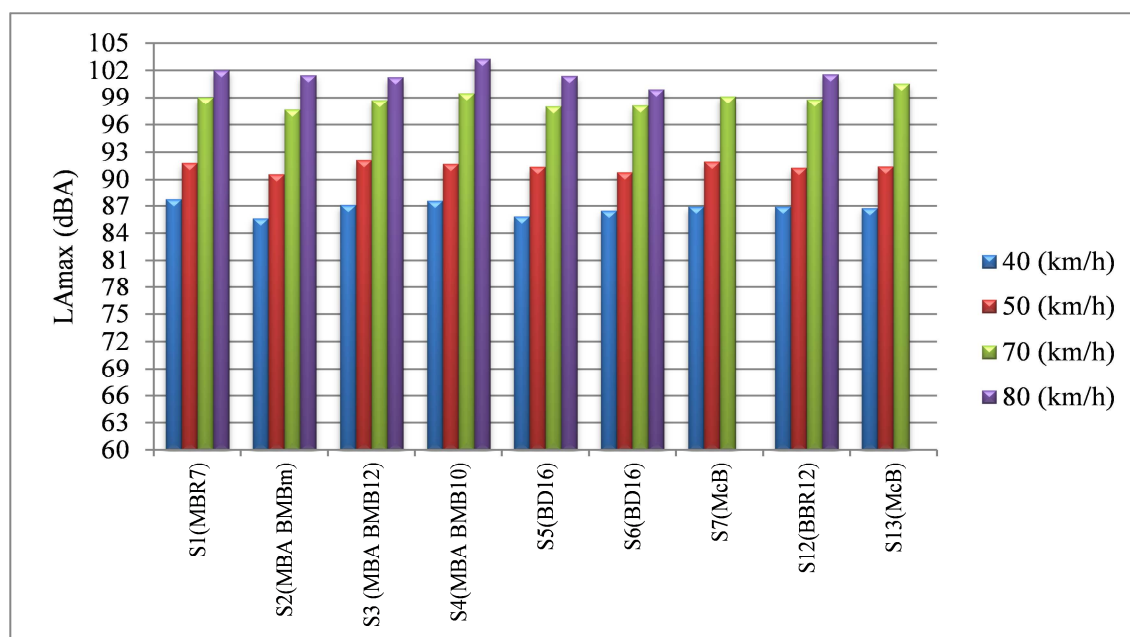


Fig. 2. Níveis de ruído correspondentes à média dos valores medidos a cada 10 m pelo método CPX.

Método SPB

A avaliação do ruído pelo método SPB baseou-se na norma ISO 11819-1. Esta norma preconiza o cálculo do índice SPBI que devolve um valor de ruído que é ponderado pelo tipo de veículo e requer um número mínimo de veículos por categoria. Contudo, em grande parte das secções selecionadas para o estudo não foi possível atingir-se o número mínimo de veículos pesados em cada categoria. Não obstante esta questão, foi aplicado todo o procedimento de cálculo apenas aos veículos ligeiros. Consequentemente, foram determinados os parâmetros de regressão da reta nível máximo de ruído (L_{Amax}) – logaritmo decimal da velocidade. A qualidade do ajuste das retas definida pelo coeficiente de determinação (R^2) compreendeu-se entre 0,50 e 0,60, o que pode ser considerado aceitável dado não é possível controlar as condições de circulação dos veículos e o comportamento dos condutores.

Na Figura 3 apresenta-se o nível de ruído estimado a partir da reta de regressão para as velocidades de 50 km/h, 70 km/h e 90 km/h (limites legais). Apresenta-se ainda a profundidade média da textura (MPD) medida em cada secção. Como é natural, nestas condições o nível de ruído é substancialmente mais baixo do que o obtido no método CPX.

A superfície que apresentou os níveis de ruído mais baixos a todas as velocidades foi a S2(MBA BMBm) enquanto que a superfície S14 apresentou os valores mais elevados, sendo que a diferença entre as duas é de cerca de 5 dB(A). Neste conjunto de superfícies encontra-se uma mistura drenante, que apesar de possuir uma porosidade muito elevada mostrou ter um desempenho muito próximo de uma mistura em betão betuminoso.

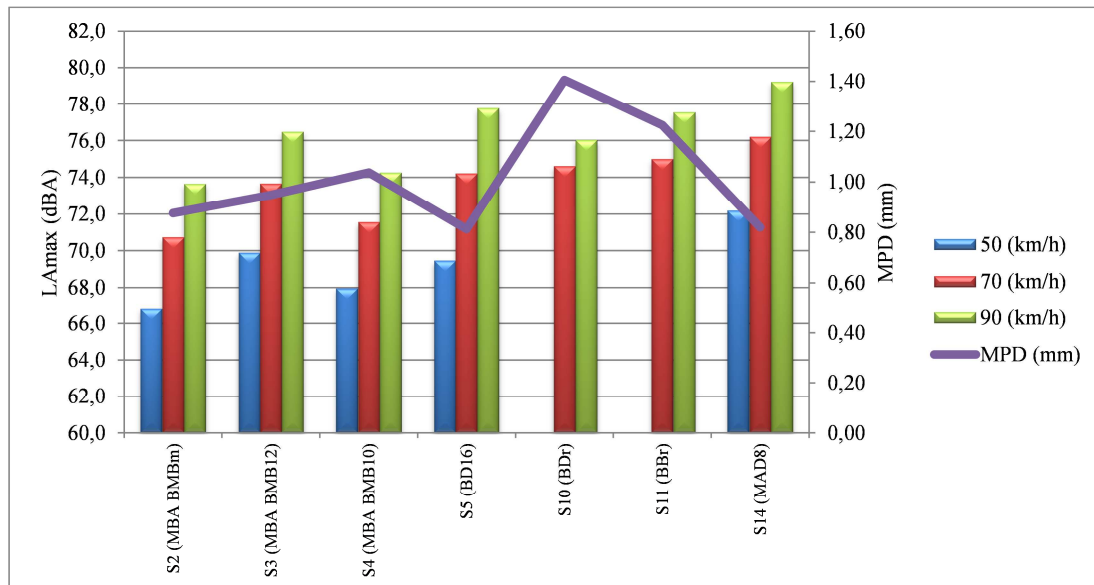


Fig. 3. Níveis de ruído máximo obtidos pelo método SPB e estimados para as velocidades entre 50 km/h e 90 km/h e correspondente profundidade média do perfil.

Método CPB

Na Figura 4 representa-se os níveis de ruído dos veículos ligeiros para as várias superfícies, para as velocidades de 50 km/h, 70 km/h e 90 km/h. Estes valores foram calculados a partir da reta de regressão do nível de ruído versus logaritmo decimal da velocidade. A qualidade de ajuste, das retas determinadas, aferida pelo coeficiente de determinação (R^2), pode ser considerada excelente, o que se deve ao facto do ensaio ser controlado.

A partir da figura pode analisar-se o desempenho relativo de cada tipo de superfície. Assim, verifica-se que a superfície em cubos de granito (S8(CG)) apresenta os maiores níveis de ruído. Observa-se também um conjunto de superfícies, de natureza fechada, com níveis de ruído muito semelhantes. Destacam-se as superfícies S2(MBA BMB12), S15 (MDa6) e S16(MDf6), pelos seus valores reduzidos a todas as velocidades e a superfície S1(MBR7) com um desempenho excelente a velocidades elevadas. Estas superfícies são caracterizadas por uma textura negativa, pela dimensão reduzida dos agregados. A comparação dos resultados obtidos na superfície S5(BD16) ou na S6(BD16) e a superfície S17(BD12) mostra claramente o efeito da dimensão máxima dos agregados, que se traduz numa diferença superior a 2 dB(A).

Os resultados podem ainda ser abordados de forma relativa. Se, por exemplo, a superfície S5(BD16), que é um betão betuminoso de desgaste, for tomada como referência, é possível reduzir-se o ruído de contacto pneu-pavimento de cerca de 6 dB(A) com a seleção de uma camada de desgaste delgada (Figura 5).

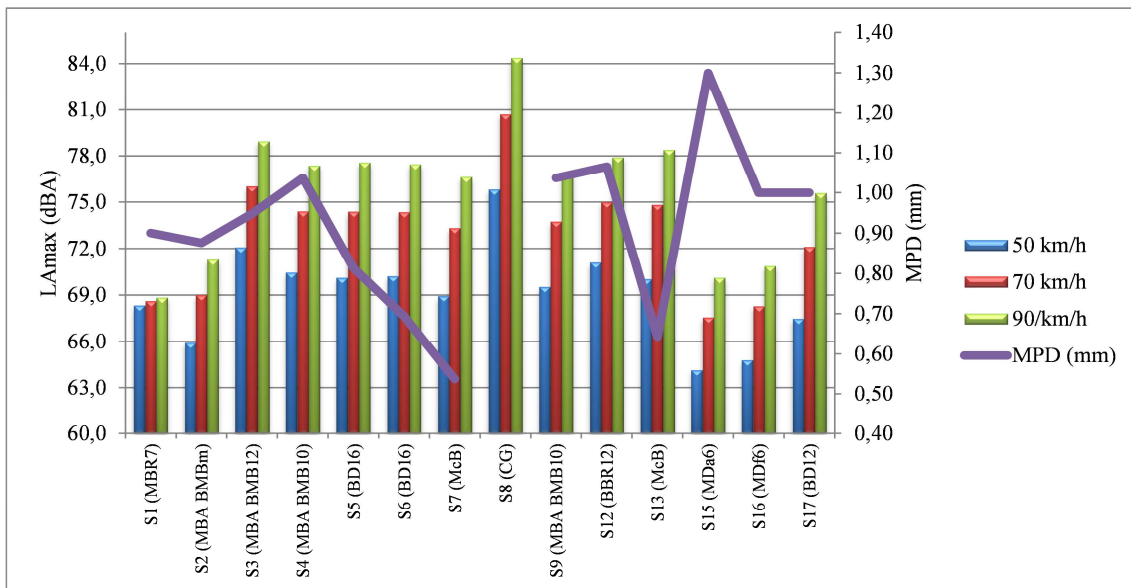


Fig. 4. Níveis de ruído máximos obtidos pelo método CPB e estimados para as velocidades de 50 km/h a 90 km/h e correspondente profundidade média do perfil.

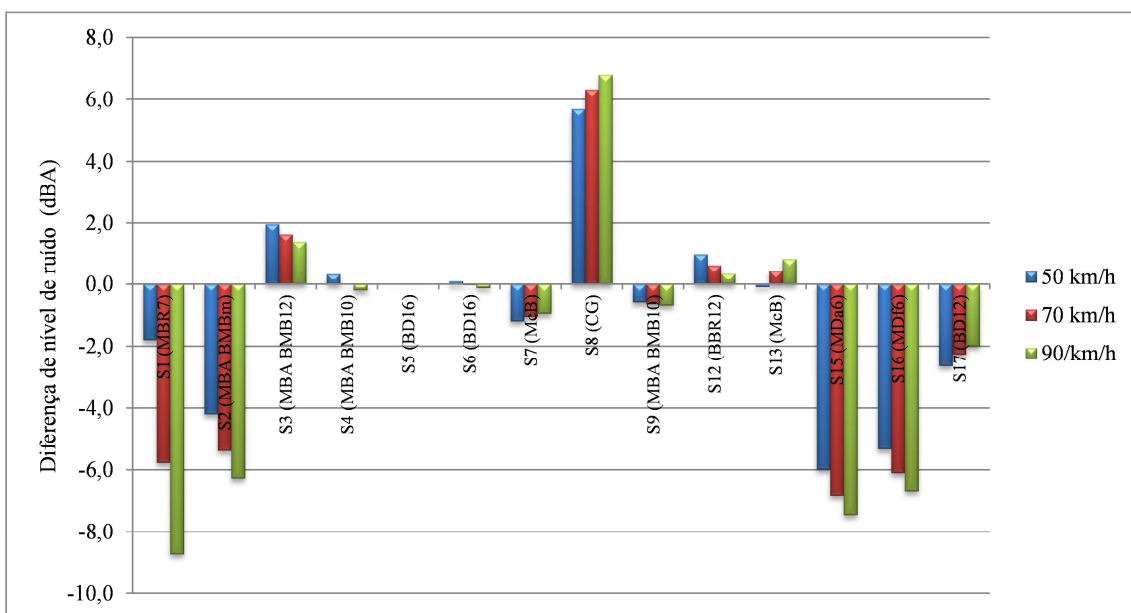


Fig. 5. Diferença de nível de ruído tomando como referência uma superfície em betão betuminoso.

A Figura 5 mostra que quanto maior for a velocidade maior é a variação do nível de ruído. O parâmetro declive que se encontra representado na Figura 6, é uma característica de cada tipo de superfície. Este parâmetro traduz a variação do nível de ruído com a variação da velocidade. Quanto maior for este parâmetro mais depressa se sentirá uma diferença no nível de ruído para pequenas variações de velocidade. Este aspeto deve ser apreciado particularmente em áreas onde podem ocorrer grandes variações de velocidade.

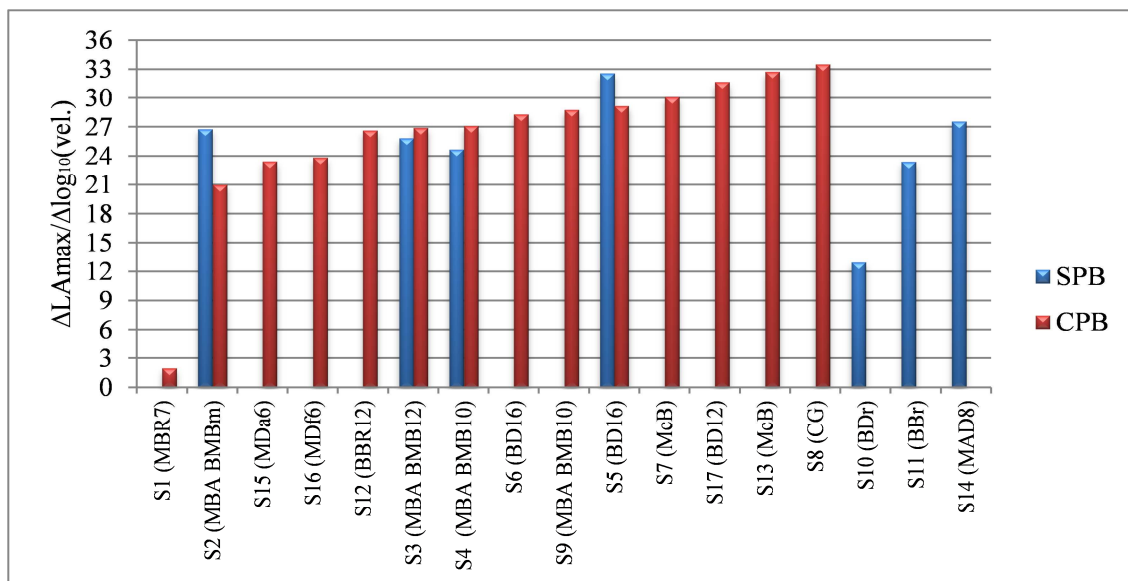


Fig.6. Relação entre o nível de ruído e o logaritmo decimal da velocidade para cada secção determinada para os métodos CPB e SPB.

Do conjunto das superfícies estudadas, aquela que tem um declive menor é a superfície em betão betuminoso drenante. As camadas em micraglomerado e em betão betuminoso são as que têm maiores declives. A superfície em cubo de granito para além de gerar os maiores níveis de ruído tem também o maior declive, no entanto deve ser considerada isoladamente pela sua natureza.

Absorção sonora

Na Figura 7 apresenta-se o coeficiente de absorção sonora médio, medido a cada 10 m ao longo da secção de ensaio e na Figura 8 o espetro de absorção sonora que mais se aproxima do valor médio. A maioria dos valores encontra-se abaixo dos 5%, o que corresponde a materiais reflexivos. Destaca-se a superfície S2 (MBA BMBm), cujo coeficiente de absorção médio se aproxima de 30% e que pontualmente ultrapassa os 40% a cerca de 1100 Hz.

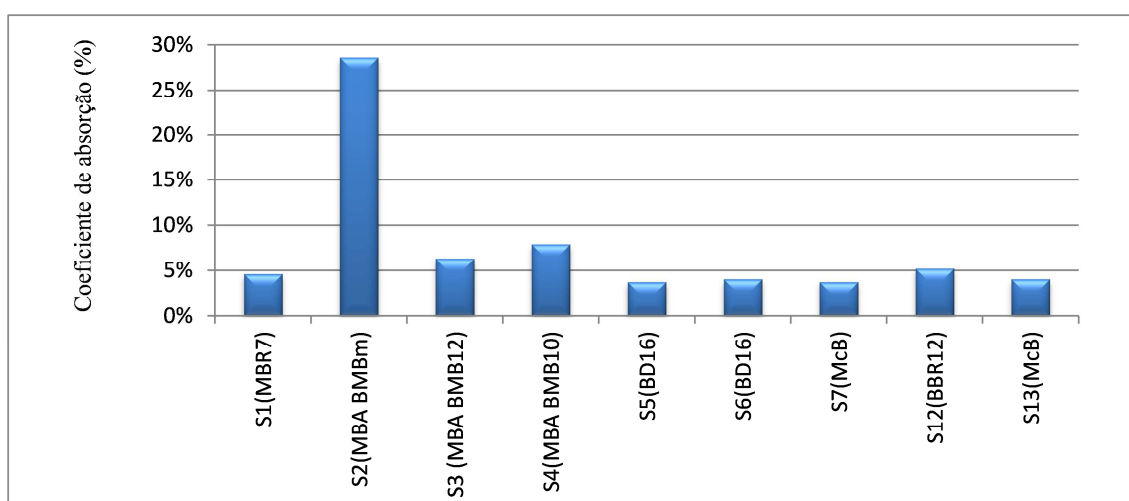


Fig. 7. Coeficiente de absorção médio.

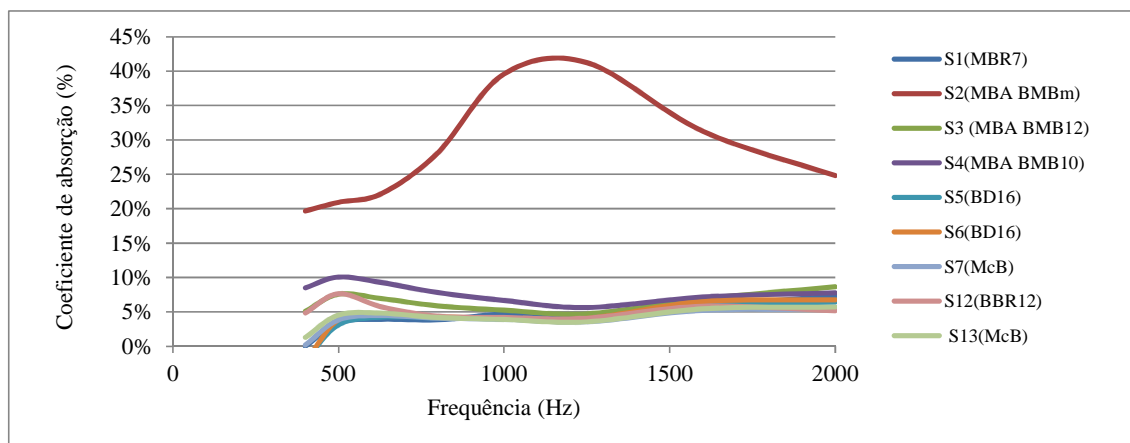


Fig. 8. Espectros de absorção sonora para cada secção.

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentam-se e aplicaram-se os métodos essenciais para uma gestão eficaz do ruído rodoviário a 17 secções de estudo que integram uma larga tipologia de camadas superficiais de pavimentos usadas em Portugal. Os métodos dizem respeito à avaliação do ruído pneu-pavimento e ainda, complementarmente, à avaliação da textura e da absorção sonora.

Durante a sua aplicação foram sentidas várias dificuldades, por um lado relacionadas com a seleção dos locais de ensaio devido à topografia acidentada que caracteriza o norte de Portugal e por outro à implementação do próprio método, como é o caso da absorção sonora. Por ser um método pontual, a medição da absorção requer a interrupção do tráfego. Seria desejável a substituição deste método por um de medição em contínuo, contudo ainda por desenvolver.

Relativamente ao método da proximidade imediata (CPX) a sua implementação é fácil por se tratar de um método de medição em contínuo e que se integra na corrente de tráfego. Neste trabalho adotou-se um processo de análise dos resultados semelhante ao usado nos restantes parâmetros de caracterização do estado funcional dos pavimentos. Foi medido o nível de ruído ao longo de trechos de 10 m, posteriormente usado no cálculo da média, cujo valor caracteriza o nível de ruído da secção de 200 m.

Conclui-se deste modo que para o método CPX é necessário a validação de uma metodologia que se coadune com as práticas generalizadas de avaliação da qualidade dos pavimentos e complementado por outros ensaios, uma vez que as diferenças de ruído na origem tendem a ser inferiores às medidas junto ao pavimento.

Quanto ao método estatístico de passagem (SPB), baixos coeficientes de determinação, resultantes da regressão dos valores medidos de ruído em função da velocidade, acrescentam incerteza quando se pretende comparar resultados.

Por sua vez o método de passagem controlada (CPB) tem por um lado elevados coeficientes de determinação e por outro pode representar de forma deficiente o conjunto dos veículos. No entanto, quando se pretende analisar os resultados de forma relativa parece ser o melhor método.

A análise do nível de ruído das superfícies observadas mostrou que as superfícies em betão betuminoso drenante e com betume modificado com borracha têm um desempenho semelhante ao de

outras camadas. As superfícies delgadas e portanto com agregados de dimensões reduzidas mostraram ter um desempenho superior.

Os cubos de granito são uma solução adotada frequentemente em zonas urbanas. A escolha desta solução deve ser criteriosa uma vez que foram registadas diferenças relativas às camadas que geram menos ruído que atingem os 14 dB(A). Destaca-se que é possível encontrar-se soluções de superfícies para estradas de baixo volume de tráfego esteticamente interessantes e de baixo ruído.

Salienta-se que estes resultados evoluem com o tempo devido à acção do tráfego que altera as características das superfícies, particularmente a textura e a porosidade.

Este trabalho permitiu uma primeira avaliação dos níveis de ruído das camadas superficiais. Porém, há ainda vários aspetos que devem ser estudados e conjugados de forma a que se possa caminhar para uma gestão integral dos pavimentos. Em primeiro lugar, os valores aqui apresentados para cada camada evoluem com o tempo/tráfego e são afetados pelas condições climáticas, pelo que é necessário estabelecer e validar expressões de correção do efeito da temperatura para cada método. Além disso, em Portugal chove em média em 25% dos dias do ano, pelo que não se deve negligenciar o incremento de ruído que ocorre quando a superfície dos pavimentos se encontram molhadas.

Embora o tráfego de pesados seja reduzido comparativamente ao tráfego de ligeiros, o ruído produzido pelos veículos pesados é muito superior ao dos ligeiros e a relação nível de ruído-tipo de superfície não é a mesma, pelo que é importante desenvolver-se um estudo para tratar apenas deste tipo de veículos.

Foi dado o primeiro passo que visa integração do parâmetro ruído pneu-pavimento no sistema de avaliação da qualidade dos pavimentos. Desta forma no futuro será possível uma avaliação integral do desempenho que permitirá apoiar as estratégias de conservação da rede.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado no âmbito do Programa Operacional Temático Factores de Competitividade (COMPETE) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER, através dos projetos FCOMP-01-0124-FEDER-007560 e PEst-OE/ECI/UI4047/2011.

REFERÊNCIAS

- Anfosso-Lédée, F. and Pichaud, Y. (2007). Temperature effect on tyre-road noise. *Applied Acoustics* 68, pp 1–16.
- Blokland, G. and Roovers, M. (2005). Sustainable Road Surfaces for Traffic Noise Control - Measurement Methods, D14, SILVIA report M+P-015-02-WP2-14/07/05, European Commission.
- Freitas, E., Pereira, P., Picado-Santos, L., Santos, A. (2009). Traffic Noise Changes Due to Water on Porous and Dense Asphalt Surfaces. *Road Materials and Pavement Design*, Vol. 10 N°3/2009 – July-September, pp587-608.
- Freitas, E.; Raimundo, I.; Inácio, O; Pereira, P., (2010). In situ assessment of the normal incidence sound absorption coefficient of asphalt mixtures with a new impedance tube. 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2010, Lisbon.

- Gomes, L.; Seixas, P. (2006). Utilização de Misturas Betuminosas com Betume Modificado com Borracha na obra do IC24, entre Frexieiro e Alfena. Seminário LNEC/CRP - Pavimentos Rodoviários Verdes, Lisboa.
- ISO 11819-1: 1997. Acoustics – Method for measuring the influence of road surfaces on traffic noise – Part 1: statistical pass-by method.
- ISO CD 11819-2: 2000. Acoustics – Method for Measuring the Influence of Road Surfaces on Traffic Noise – Part 1: The Close Proximity Method.
- Morgan, P., Sandberg, U., Blokland, G. (2009). The selection of new reference test tyres for use with the CPX method, to be specified in ISO/TS 11819-3. 38th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2009, Ottawa.
- Sandberg U., Ejsmont J. (2002). Tire / Road Noise Reference Book, Informex SE – 59040, Kisa, Sweden (<http://www.informex.info>).
- Ruivo, F. (a) (2004). Avaliação do Efeito do Pavimento no Ruído de Tráfego Rodoviário – relatório de ensaios - pavimento B.M.B. versus pavimento B.A.C., CERTIPROJECTO, Lisboa.
- Ruivo, F. (b) (2004). Avaliação do Efeito do Pavimento no Ruído de Tráfego Rodoviário (II) – relatório de ensaios - pavimento B.M.B. versus pavimento B.B.R., CERTIPROJECTO, Lisboa.

SUPERFÍCIES DE BAIXO RUÍDO COM MATERIAIS INOVADORES

Elisabete Freitas

Joel Oliveira

Pedro Machado

Simão Pereira

Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, PORTUGAL

RESUMO

Este artigo aborda a integração de materiais que não utilizados correntemente nas camadas de desgaste dos pavimentos rodoviários, mas que são amplamente utilizados na construção de edifícios para reduzir o ruído. Esses materiais são argila expandida e granulados de cortiça vulcanizada. O primeiro é caracterizado por uma elevada porosidade e, por conseguinte, foi utilizado em misturas que se aplicam à superfície, para promover a absorção do ruído. O segundo é caracterizado por um comportamento resiliente e foi usado em misturas de camada de regularização, para amortecer as vibrações originadas pela circulação dos veículos. O objetivo principal do trabalho foi comprovar o comportamento mecânico e acústico em laboratório para posterior implementação à escala real, assegurando as características de superfície, tais como o atrito. Os primeiros resultados são muito encorajadores. Estas misturas quando comparadas com misturas convencionais equivalentes, apresentam melhores propriedades mecânicas. As propriedades acústicas e respetivas propriedades relacionadas, tais como, a absorção de ruído e o amortecimento indicam também um desempenho superior.

Palavras-chave: pavimento de baixo ruído, granulados de cortiça, argila expandida, absorção, amortecimento

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade das infraestruturas, entre outros aspectos, passa pela redução dos impactos ambientais. A utilização de agregados artificiais em superfícies de pavimentos rodoviários contribui, não só para uma redução da extração de agregados naturais, mas também para uma diminuição do ruído resultante do tráfego rodoviário. Neste âmbito, e até ao momento, houve um número muito limitado de projetos, tais como, o PERSUAD [Goubert e Sandberg, 2010] e o LEOPOLDO [Massimo et al., 2008]. O primeiro baseou-se na noção de que, o percurso óbvio a seguir para se obter uma redução substancial de ruído pneu/pavimento é fazendo uma superfície com propriedades elásticas [Goubert e Sandberg, 2010], o que pode ser conseguido utilizando elevadas percentagens de borracha reciclada de pneus. Os resultados indicados são excelentes, no entanto, exige alterações tecnológicas significativas, e portanto, um tempo relativamente longo para alcançar a desejada redução de ruído. O segundo estudo utiliza como agregado a argila expandida, sendo este um material leve e poroso. Este procedimento pode ser interessante porque não exige alterações importantes no processo de construção, mesmo com uma de redução do ruído inferior.

Uma forma alternativa de reduzir o ruído de tráfego passa por melhorar as propriedades acústicas e mecânicas da camada superficial, que em conjunto com uma melhoria das propriedades de amortecimento da camada de regularização, poderão proporcionar um desempenho acústico do pavimento mais eficiente.

Neste contexto foram avaliados dois materiais não convencionalmente utilizados em pavimentos rodoviários, mas amplamente utilizados na construção de edifícios para reduzir o ruído. Estes materiais são a cortiça e a argila expandida, que foram adicionados a uma mistura betuminosa convencional de regularização e a uma mistura aberta delgada respetivamente.

Com o primeiro espera-se amortecer as vibrações originadas pela passagem dos veículos no topo do pavimento, devido fundamentalmente ao comportamento resiliente da cortiça, e com o segundo melhorar a absorção de ruído na sua superfície do pavimento. Desta forma, será então viável inovar, alterando ao mínimo as técnicas de construção e, conseqüentemente, obter resultados satisfatórios e imediatos.

A seguir, aborda-se o comportamento mecânico e acústico de cada uma das misturas mencionadas e são delineadas algumas recomendações.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Neste estudo foram produzidas quatro misturas betuminosas, duas delas são do tipo AC14 bin (camada de regularização) e as outras duas são camadas delgadas e, portanto aplicáveis como superfície de desgaste. Em ambos os grupos, uma das misturas foi construída para controlo, produzida com materiais clássicos e de forma convencional. As outras misturas foram produzidas com materiais inovadores, substituindo parte dos agregados graníticos. Os materiais utilizados neste estudo foram, o betume, filler calcário, agregados graníticos, granulados de cortiça e de argila expandida.

Granulados de cortiça

Portugal é o maior produtor de cortiça e processa cerca de três quartos da cortiça do mundo. A cortiça é constituída por: 45% de suberina, 27% de lenhina, 12% de celulose e polissacaridos, 6% de taninos, 5% deceróides, 5% de cinza e outros produtos. Os grânulos de cortiça resultam de resíduos resultantes da produção de rolhas de cortiça, de cortiça de baixa qualidade [Rives et al., 2012] e de cortiça virgem, possuindo inúmeras aplicações [Gil, 2009].

As principais características da cortiça são: elasticidade, baixa densidade, impermeabilidade a fluídos, isolante térmico/eléctrico e com capacidade de absorção de som/vibrações. Além disso, uma vez que é um material resiliente, quando lhe é aplicada uma carga, ela tem uma grande capacidade para recuperar as deformações [Gibson et al., 1981] e devido à sua estrutura celular e porosa, admite uma penetração fácil das ondas sonoras.

Na área da engenharia civil, a cortiça é utilizada principalmente como aglomerado para isolamento de ruídos de percussão, isolamento térmico de paredes e de telhados, mas também há relatos de estudos sobre o uso de granulado de cortiça como agregado leve para a produção de estruturas com muito baixo peso [Nóvoa et al., 2004].

Os grânulos de cortiça utilizados neste estudo têm dimensões compreendidas entre 1 e 4 mm.

Granulados de argila expandida

A argila expandida é um material de forma esférica, fabricado a partir de pó de argila natural, que ao ser aquecido em fornos a altas temperaturas se expande, resultando assim uma massa com uma estrutura porosa, tipo uma espuma cerâmica, com uma percentagem elevada de microporos semi-fechados. As suas principais características são: estabilidade dimensional, isolamento térmico e acústico, massa muito leve que se combina com uma resistência estrutural relativamente elevada e baixo custo [Vasina et al., 2006]. Os poros contribuem para o desempenho acústico de duas formas. Em primeiro lugar, contribuem para o aumento global da porosidade da mistura granular. Em segundo lugar, eles são capazes de absorver o excesso de betume que, caso contrário, tende a acumular-se em torno dos macroporos implicando assim, uma diminuição no desempenho acústico da mistura consolidada [Vasina et al., 2006].

Este material já foi usado em misturas betuminosas de baixa porosidade e demonstrou haver benefícios consideráveis nas características mecânicas, no atrito e no desempenho acústico [Massimo et al., 2008]. Além disso, observou-se em misturas de betão de cimento um bom desempenho, caso a dimensão característica adoptada para as partículas de argila fosse inferior a 3,5 mm [Vasina et al., 2006].

Com base nisto, optou-se então por usar partículas de argila expandida com granulometria entre 2 e 4 milímetros.

Agregados

Os agregados utilizados nas misturas betuminosas asfálticas produzidas durante este estudo são de origem granítica, à exceção do filler que é calcário. A Figura 1 apresenta as curvas granulométricas das quatro misturas produzidas. Pode-se observar que cada mistura tem uma granulometria muito semelhante à respetiva mistura de controlo.

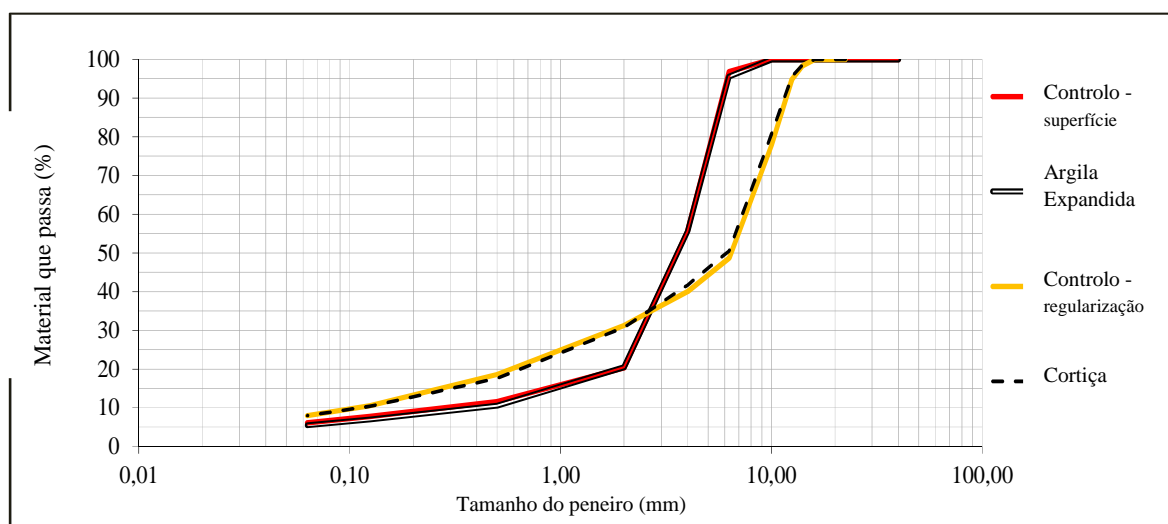


Fig. 1. Curvas granulométricas para a camada de regularização e para a camada superficial.

Betume

O betume utilizado para a camada de regularização foi um betume com penetração 50/70. Devido à aberta natureza da mistura e, portanto, a um elevado risco de perda de agregado, o betume utilizado na mistura da camada superficial foi um betume modificado (com SBS) caracterizado por um ponto de amolecimento de 65 °C e uma penetração de 52 (x 0,1) mm.

Misturas

No que respeita à camada superficial optou-se por conceber uma mistura aberta com a incorporação de 10% (em volume) de argila expandida com dimensões entre 2 e 4 mm, com base nos bons resultados indicados na literatura [Massimo et al., 2008; Vasina et al., 2006.]. No caso da camada de regularização, foram substituídos 5% (em volume) dos agregados por granulados de cortiça, seguindo a prática corrente aplicada às misturas betuminosas com incorporação de borracha pelo processo seco. A mistura selecionada para a camada de regularização é semelhante à usada na camada superficial. Por esta razão, os ensaios efetuados para avaliar o desempenho acústico da camada superficial foram também realizados na camada de regularização. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades das misturas.

Tab. 1. Propriedades das misturas.

Mistura	Proporção em peso (%)			Teor ótimo de betume (%)	Volume de vazios (%)
	Filler	Agregados	Cortiça / Argila Exp.		
Controlo (regularização)	3,3	91,7	-	5,0	6,87
Cortiça	4,0	90,4	0,4 (5% em volume)	5,2	4,17
Controlo (superfície)	4,7	89,4	-	5,9	16,62
Argila expandida	4,5	86,3	2,8 (10% em volume)	6,4	17,81

Métodos para avaliar as propriedades mecânicas e de superfície

Para avaliar o desempenho mecânico das misturas produzidas, foram realizados ensaios de resistência à deformação permanente, através do ensaio de pista (PT 12697-22), sensibilidade à água (PT 12697-12) e perda de massa (NLT 362) das misturas. Todas as misturas foram submetidas ao ensaio de Pêndulo Britânico (EN 13036-4) e à Técnica Volumétrica da Mancha (EN 13036-1) para avaliar o atrito e a profundidade média da textura.

Métodos para avaliar o desempenho acústico

Para determinar o desempenho acústico e deste modo avaliar as propriedades que podem afectar a geração e propagação de ruído de tráfego, realizaram-se dois ensaios distintos em cada uma das misturas, sendo eles a absorção acústica (Figura 2. a)) e a impedância mecânica (Figura 2.b)).

A medição da absorção acústica foi efectuada utilizando um tubo de impedância auto-fabricado (de acordo com a norma ISO 10534-2), ao qual se acopla uma fonte sonora e dois microfones, controlados por um analisador de sinal (Bruel & Kjaer).



Fig 2. Imagens dos ensaios de: a) absorção acústica com o tubo de impedância, b) impedância mecânica usando um martelo instrumentado e um acelerômetro.

O tubo possui um diâmetro de 80 mm, é maciço (5mm de espessura) e suficientemente rígido para evitar perdas de energia por transmissão, não só de ruído do interior para o exterior do tubo, como também das vibrações devido à excitação da fonte sonora e/ou ao pavimento. Este tubo tem uma extremidade aberta, que é colocada sobre a superfície a ser analisada. Posteriormente, a fonte sonora gera um campo acústico unidimensional, em que, as ondas planas são refletidas e absorvidas pelo pavimento e/ou amostra a analisar no final do tubo. O coeficiente de reflexão R ou o coeficiente de absorção $\alpha=1-|R|^2$ foram calculados a partir da impedância acústica Z ao longo de um intervalo de frequências entre 250 Hz e 2,5 kHz (1/3 de oitava).

O amortecimento da superfície de um pavimento é uma medida para determinar a capacidade da estrutura em dissipar a energia. Pode ser obtido através da função de resposta em frequência entre a força impacto aplicada por um martelo numa camada do pavimento e a resposta da estrutura em termos da sua velocidade. A relação de amortecimento (ξ) associada à frequência de ressonância de cada modo de vibração pode ser calculada em seguida através do método de largura de banda [Ewins, 2000]. O procedimento descrito foi adaptado para aplicação em provetes laboratoriais.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho mecânico

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de perda de massa e de sensibilidade à água das quatro misturas. Os resultados estão dentro dos limites normalmente exigidos. No que diz respeito à perda de massa, a mistura com cortiça teve um comportamento significativamente melhor do que a mistura de controlo. Este desempenho deve-se possivelmente a uma melhor adesão entre os grânulos de cortiça e o betume. No entanto, a perda de massa, para as camadas superficiais é muito pequena em ambas as misturas, indicando que é viável aumentar a quantidade de argila expandida na mistura, para se obter resultados acústicos superiores. Os resultados de sensibilidade à água também estão dentro dos limites normalmente exigidos. Devido à natureza aberta da camada superficial, pretende-se no futuro testar a resistência ao gelo destes materiais.

A Figura 3 apresenta a evolução da deformação permanente até aos 10 000 ciclos de carga (a 60°C) para as misturas da camada de regularização. A mistura de cortiça apresentou um desempenho superior em relação à respetiva mistura de controlo. Isto pode dever-se ao comportamento elástico/resiliente da cortiça, que toma a posição original após sofrer uma carga compressiva e,

possivelmente, uma melhor adesão do ligante com a cortiça conferindo à mistura uma maior resistência ao corte. Para averiguar esta última hipótese foram efetuados ensaios de microscopia eletrônica por varrimento às misturas com cortiça e com argila, cujas imagens comprovam uma boa ligação entre estes materiais e o betume (Figura 4).

Tab. 2. Percentagens de Vv, Perda de massa e ITSR.

Mistura	Volume de vazios (%)	Perda de massa (%)	ITSR (%)
Controlo (regularização)	6,87	9,08	85,9
Cortiça	4,17	4,92	88,9
Controlo (superfície)	16,62	3,88	86,2
Argila expandida	18,47	2,80	91,7

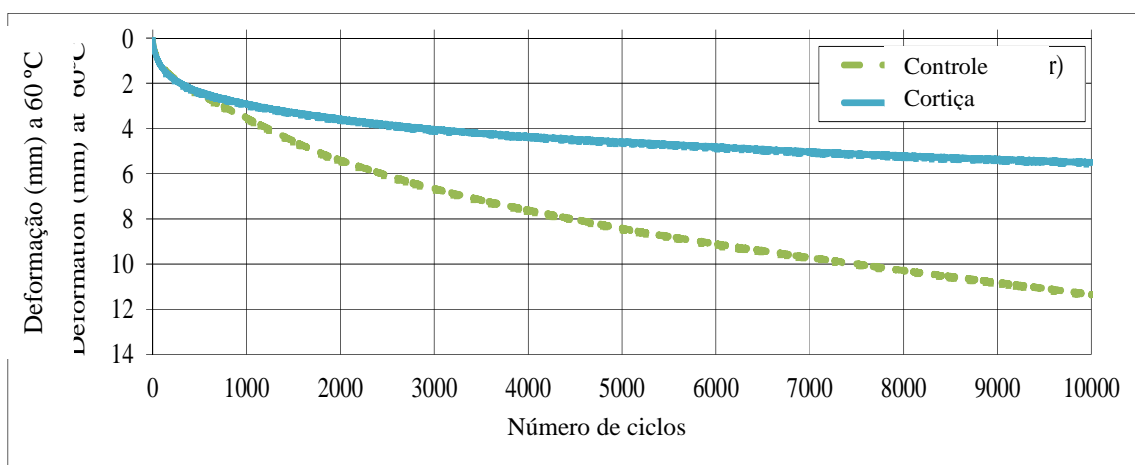


Fig. 3. Resultados do ensaio de pista obtido para as misturas estudadas.

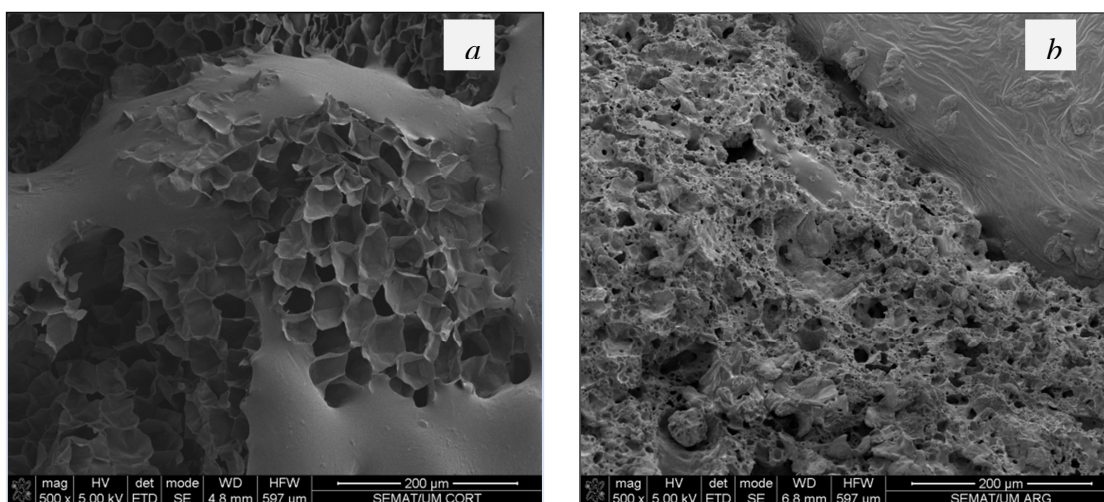


Fig. 4. Imagem de microscopia eletrônica por varrimento dos agregados com betume:
a) Cortiça; b) Argila Expandida.

A Tabela 3 apresenta os valores do ensaio de pêndulo britânico (PTV) e os resultados da profundidade média da textura (MTD). Todas as misturas cumprem os limites especificados para cada tipo de mistura. Isto significa que, a adição de cortiça e argila expandida a misturas betuminosas não

compromete a segurança no início do tempo de vida do pavimento. Além disso, os ensaios de polimento acelerado (EN 1097-8) realizados nos granulados de argila expandida (Figura 5) mostram que esta propriedade que tende a aumentar com o tempo, ou seja, o atrito aumenta devido à estrutura interna porosa e aberta da argila que se mantém inalterada com o desgaste. É ainda de realçar que esta tendência é contrária à que ocorre nos agregados graníticos tradicionais, que vão ficando cada vez mais polidos com o tempo e conseqüentemente menos aderentes.

Tab. 3. Resistência à derrapagem e profundidade média da textura.

Mistura	Regularização		Camada superficial	
	Controlo	Cortiça	Controle	Argila expandida
PTV	67	68	63	60
MTD [mm]	0,9	0,8	1,2	1,5

A diferença nos valores de MTD entre as camadas superficiais (com argila e de controlo) era espectacular com base na observação visual das mesmas. Este fato deve-se possivelmente à absorção do excesso de betume pela argila expandida, o que vai de encontro ao relatado na literatura [Vasina et al., 2006].

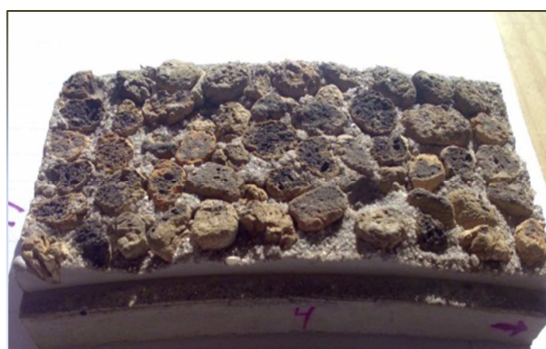
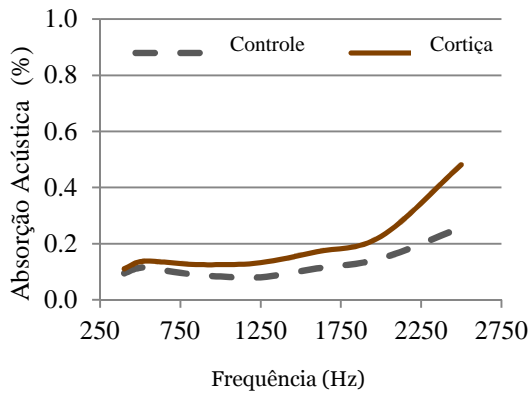


Fig. 5. Imagem de um provete com argila expandida após o ensaio de polimento acelerado.

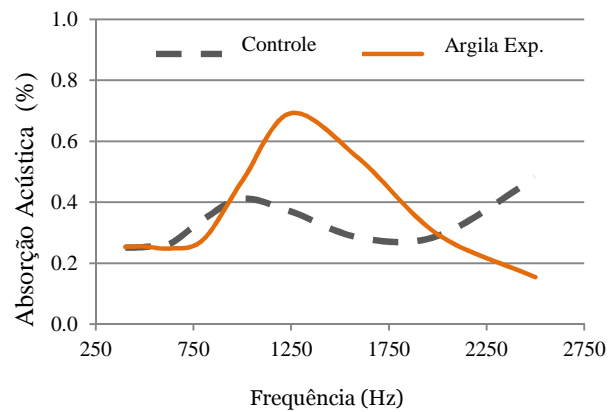
Desempenho acústico

A Figura 6 apresenta a absorção acústica para as quatro misturas. Como esperado, as camadas de regularização são caracterizadas por coeficientes de absorção baixos, devido ao seu reduzido volume de vazios, embora a presença de cortiça conduza a valores de absorção mais elevados a frequências mais altas. O efeito da cortiça, provavelmente, será mais significativo se for utilizado em camadas mais delgadas, resultando assim, um deslocamento para a esquerda do pico de absorção (frequências mais baixas). Note-se que esta análise foi realizada apenas para explorar a potencial de utilização da cortiça em camadas superficiais ou de desgaste. O efeito da argila expandida nesta propriedade é notável, elevando o seu coeficiente de absorção máximo de 40% para 75%.

No que diz respeito às características de amortecimento (Tabela 4), a argila expandida conduz a taxas de amortecimento superiores, principalmente a altas frequências. No entanto, esta também afeta notavelmente o primeiro modo de vibração, isto é, a frequência de ressonância que ocorre aos 213 Hz (na mistura de controle ocorre aos 884 Hz). Por sua vez, a cortiça afeta apenas um pouco o amortecimento a baixas frequências, embora seja relevante observar que a quantidade de cortiça é pequena em comparação com a argila expandida.



a)



b)

Fig. 6. Absorção sonora: a) camadas de regularização; b) camadas superficiais.

Tab. 4. Características de amortecimento para as camadas de regularização e de superfície.

Camada	Modo (φ_P)	Fr ressonância (Hz)	Amortecimento ζ (%)	Camada	Modo (φ_P)	Fr ressonância (Hz)	Amortecimento ζ (%)
Controle (Regularização)	1	577,3	17,2	Controle (Superfície)	1	884	20,7
	2	1253	10,7		2	1540	17,9
	3	1979	8,9		3	2262	10,0
	4	2572	7,6		1	213	23,1
Cortiça	1	545	18,7	Argila Expandida	2	662	22,5
	2	1246	13,8		3	1257	19,2
	3	1604	7,3		4	1930	17,4
	4	2225	5,1				

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este artigo apresentou um estudo exploratório sobre o uso de materiais não convencionais em camadas de pavimentos rodoviários visando a redução de ruído pneu-pavimento. Estes materiais são a cortiça e a argila expandida, sendo que as misturas correspondentes revelaram melhores propriedades acústicas (absorção de ruído e amortecimento e um melhor desempenho mecânico).

A camada superficial com a argila expandida tem uma capacidade relativamente boa para dissipar a energia e um elevado coeficiente de absorção. Apesar dos bons resultados mecânicos desta mistura, é

ainda necessário efetuar ensaios adicionais a fim de garantir a durabilidade requerida aquando da sua exposição ao tráfego.

O objectivo de desenvolver uma camada de regularização para amortecer as vibrações provenientes do topo não foi alcançado nesta fase do estudo. Os coeficientes de amortecimento foram menores do que o esperado, provavelmente devido à quantidade reduzida de cortiça usada (5% em volume). No entanto, os bons resultados mecânicos obtidos indicam a possibilidade de utilizar quantidades mais elevadas deste material na camada de desgaste. **AGRADECIMENTOS**

Este estudo foi financiado no âmbito do Programa Operacional Temático Factores de Competitividade (COMPETE) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER, através dos projetos FCOMP-01-0124-FEDER-007560 e PESt-OE/ECI/UI4047/2011.

REFERÊNCIAS

- Ewins, (2000). *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press Ltd., UK.
- Gibson, J., Easterling, K., Ashby, M., (1981). *The Structure and Mechanics of Cork*. Royal Society of London, 377, 99-117.
- Gil L., (2009). Cork Composites: A Review, *Materials*, 2, 776-789.
- Goubert, L. and Sandberg, U. (2010), The PERSUADE project: developing the concept of poroelastic road surface into a powerful tool for abating traffic noise, *Internoise 2010*, Lisbon.
- Massimo, L., Pietro, L., Renato, B. (2008). Mechanical and Performance-Related Properties of Asphalt Mixes Containing Expanded Clay Aggregate, *Transportation Research Record*. Journal of the Transportation Research Board, 2051, 23-30.
- Nóvoa, P., Ribeiro, M., Ferreira, A., Marques, A., (2004). Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granulates, *Composites Science and Technology*, 64, 2197–2205.
- Rives J., Fernandez-Rodriguez I., Gabarrella X., Rieradevall J., (2012). Environmental analysis of cork granulate production in Catalonia – Northern Spain, Resources, *Conservation and Recycling*, Volume 58, Pages 132-142.
- Vašina, M., Hughes, D., Horoshenkov, K. and Lapčík, Jr L. (2006). The acoustical properties of consolidated expanded clay granulates, *Applied Acoustics*, 67-8, 787–796.

MODELOS DE PREVISÃO DO RÚIDO PNEU-PAVIMENTO

Elisabete Freitas,
Carina Freitas,
Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

Os modelos de previsão do ruído pneu-pavimento são uma ferramenta que, aplicada na fase de concepção e de formulação das misturas, indicam o desempenho da mistura em função de diversas variáveis relacionadas com a superfície e os pneus.

Neste trabalho faz-se uma abordagem inovadora com a utilização de técnicas *Data Mining* na modelação do ruído obtido pelo método CPX em função da textura, da absorção sonora e do amortecimento das camadas superficiais dos pavimentos e de outras variáveis como a velocidade e a temperatura do ar. Na totalidade foram consideradas 17 variáveis e testados 4 modelos, sendo que o modelo MLPE (*multilayer perceptron ensemble*) que utiliza redes neuronais é o que se ajusta melhor aos dados.

A análise da importância relativa das variáveis mostra que a velocidade é preponderante no modelo e que o amortecimento (indicador da capacidade de uma estrutura dissipar energia) tem uma importância muito superior à das restantes variáveis que estão relacionadas com a textura.

Estes resultados abrem perspectivas no sentido da integração de novos materiais e de novas técnicas construtivas nas camadas superficiais dos pavimentos.

INTRODUÇÃO

No processo de desenvolvimento de uma camada de baixo de ruído há um conjunto de aspetos que devem ser considerados, como por exemplo a dimensão dos agregados, a porosidade e o tipo de textura, que de certa forma garantem que o produto final terá um determinado desempenho acústico.

Os modelos de previsão do ruído pneu-pavimento são uma ferramenta que, aplicada na fase de concepção e de formulação das misturas, indica o desempenho da mistura em função das suas características e nalguns casos em função das características dos pneus. Este tipo de modelos é, por esta razão, uma ferramenta muito útil. Contudo, alguns são extramente complexos e outros, por serem simplificados, têm pouca fiabilidade.

Atualmente existem técnicas que fazem parte de um processo global de “descoberta de conhecimento”, como é o caso das técnicas *Data Mining* (DT), que permitem extrair modelos de dados com relações complexas e que proporcionam bons resultados.

Esta técnica foi utilizada neste estudo para modelar o ruído de contacto pneu-pavimento obtido pelo método CPX a diversas velocidades, em diferentes condições climáticas e em função de características das camadas tais como, espectro de textura, absorção e amortecimento.

O principal objectivo do desenvolvimento deste modelo é prever o nível de ruído de novas soluções de camadas de desgaste quando estas se encontram em fase de estudo laboratorial.

A seguir aborda-se a primeira fase de desenvolvimento do modelo, com a definição da metodologia de modelação adotada, exposição de algumas considerações quanto aos dados selecionados para o modelo e a discussão da importância de cada variável no modelo desenvolvido.

MODELOS DE PREVISÃO DO RUÍDO

Um modelo de previsão do ruído de contacto pneu-pavimento deve abordar naturalmente a superfície do pavimento e o pneu. Os mecanismos de interação são complexos o que torna o uso de expressões matemáticas extremamente complicado. Por isso existem modelos que permitem prever o ruído simulando apenas alguns dos seus mecanismos e outros que simulam todos os mecanismos.

Estes modelos podem ser classificados em modelos empíricos simples, modelos semi-empíricos e teóricos e modelos completos (Sandberg e Ejsmont, 2002).

Os modelos empíricos simples simulam o impacto dos blocos do piso do pneu na superfície do pavimento ou simulam o ruído em função das características do pavimento ou ambas as coisas.

Os modelos semi-empíricos e teóricos já permitem prever o ruído considerando o bombeamento de ar e a vibração da carcaça do pneu. Um exemplo deste tipo de modelos é o modelo de Kropp que foi melhorado por Larsson (Larsson, 2002). Outro modelo de referência é o modelo TINO por considerar condições de operação dos veículos realistas (Sandberg e Ejsmont, 2002).

Os modelos completos como é o caso do modelo TRIAS baseiam-se nas características dos pneus, como o tamanho, o material e o relevo do piso, e da superfície do pavimento, como o tamanho do agregado, percentagem de betume, densidade e tipo de camada. Esta informação é usada em sub-modelos para simular a superfície do pavimento e todos os mecanismos de geração e propagação de ruído.

Outro exemplo de modelo completo é o modelo DEUFRAKO, desenvolvido em conjunto pela França e pela Alemanha, que se baseou no modelo SPERoN (*Statistical Physical Explanation of Rolling Noise model*). Este modelo considera ainda as características visco-elásticas dos pneus e um módulo de previsão da propagação do ruído junto às fachadas dos edifícios. Possui a característica particular de ter sido adaptado para ser usado como uma ferramenta de dimensionamento (DEUFRAKO, 2009).

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DATA MINING PARA PREVISÃO DO RUÍDO

Definição e utilização

Data Mining (DM) é uma técnica que aplica algoritmos específicos para extrair modelos de dados e faz parte de um processo global de “descoberta de conhecimento” composto por cinco etapas principais: seleção de dados, pré-processamento, transformação, DM e interpretação. Assim, o DM é uma área das ciências da computação que permite encontrar tendências e relações entre variáveis com o objetivo de prever o seu estado futuro.

Devido a este conjunto de características, as técnicas DM adequam-se ao problema da modelação do ruído, sendo este um fenómeno complexo.

Aliás, estas técnicas têm sido usadas, embora com pouca frequência, em vários domínios dos pavimentos rodoviários. Existem algumas aplicações de DM na modelação das degradações dos pavimentos, como por exemplo da deformação permanente (Chen et al., 2008). Existem também, alguns exemplos de aplicação de redes neuronais na modelação do ruído do tráfego que sugerem que estas técnicas proporcionam melhores resultados do que as convencionais (Kumar et al., 2012).

Modelação e avaliação

Para a modelação do ruído pneu-pavimento foi usado o programa R (R Development Core Team, 2010), de utilização livre, que integra o pacote RMiner. Este pacote é um programa específico (Cortez, 2010) que permite aplicar vários algoritmos e avaliar o seu comportamento com um conjunto diferente de métricas. Os algoritmos de DM utilizados neste estudo foram:

- MR (*multiple regression*);
- MLPE (*multilayer perceptron ensemble*);
- SVM (*support vector machine*).

O algoritmo MR é semelhante à regressão simples. A regressão simples envolve uma variável independente enquanto que o Mr envolve várias variáveis independentes e estabelece uma relação entre elas e a variável dependente.

O algoritmo MLPE utiliza uma arquitetura muito próxima da estrutura do cérebro humano e é composto por unidades de processamento simples, denominados nódulos ou neurónios artificiais, com um grande número de interligações. É utilizado para regressão e classificação.

O SVM foram originalmente usados em problemas de classificação. A ideia básica foi separar duas classes de objetos utilizando um conjunto de funções. Os planos que separam as classes são conhecidos como hiperplanos e há um algoritmo iterativo de optimização para encontrar o hiperplano que estabelece a maior separação entre as classes. Os vectores colocados à distância mais próxima em ambos os lados do hiperplano são os vectores de suporte. Nos métodos de classificação e de regressão existe uma função de erro para minimizar, submetida a algumas restrições. Neste caso foram testados dois parâmetros de busca (*heuristic10* e *uniform design* (UD)).

Avaliação da qualidade do ajuste dos modelos foi feita através dos parâmetros erro absoluto médio (MAE – *Mean Absolute Error*) e coeficiente de determinação (R^2)

DEFINIÇÃO DA BASE DE DADOS

Secções de estudo

Neste estudo foram consideradas 9 secções com 200 m de extensão, onde foram observados os seguintes parâmetros:

- Ruído pneu-pavimento, medido pelo método CPX em trechos de 10 m;
- Textura superficial, obtida através de um perfilómetro de alta velocidade em trechos de 10 m;

- Absorção sonora, medida a cada 10 m, através de um tubo de impedância adaptado para medições sobre pavimentos rodoviários,
- Amortecimento, medido a cada 10 m.

A caracterização das secções e a análise do ruído de contacto pneu pavimento encontra-se em Freitas (2012).

Seleção das variáveis

A variável que se pretende modelar, variável dependente, é o nível de ruído medido junto ao pneu pelo método CPX. Este método possibilita a medição dum nível equivalente de ruído numa base espacial em vez de temporal, como é habitual fazer-se na avaliação da qualidade funcional dos pavimentos a nível da rede. Por conseguinte, neste estudo considerou-se o nível de ruído equivalente para um comprimento base de 10 m.

Quanto às variáveis dependentes, as que compõem a base de dados são relativas às condições de circulação dos veículos (velocidade), às condições climatéricas (temperatura do ar), ao pneu utilizado no ensaio (Avon AV4) e às características das superfícies (textura, absorção, amortecimento). A seguir são feitas algumas considerações quanto à seleção das variáveis relativas à textura, à absorção sonora e ao amortecimento das camadas.

Consideração da textura

As gamas da textura que mais influenciam o ruído são a macro e a megatextura. Para a sua determinação utilizou-se um perfilómetro para obter o perfil do pavimento numa secção de 200 m. Os dados do perfilómetro foram posteriormente introduzidos num programa desenvolvido na plataforma MATLAB ® que devolve o nível de textura em função da frequência espacial, a cada 10 m. Na Figura 1 mostra-se um dos espectros de textura a título de exemplo.

A partir de uma análise qualitativa dos espectros obtidos, foi possível dividi-los em 4 trechos, o que deriva na redução do número de variáveis implicadas no modelo, as quais se apresentam na Tabela 1.

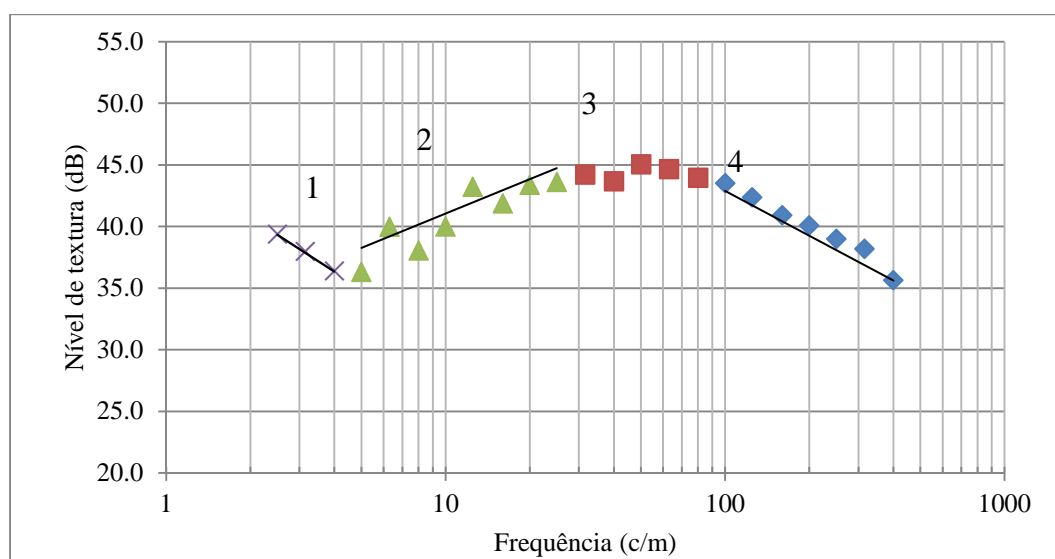


Fig. 1. Exemplos de espectros e limites adotados.

Tab. 1. Variáveis do espectro de textura selecionadas.

Trechos	Frequências espaciais selecionadas (c/m)	Comprimento de onda da textura (mm)	Parâmetro
1	2.5 and 4	400 and 250	T400, T250
2	5, 16 and 25	200, 63 and 40	T200, T63, T40
3	31.5-80	31.5-12.5	Tmean (média)
4	100 e 315	10 e 3.15	T10, T3.15

Para além destes foram ainda considerados os seguintes parâmetros de caracterização da megatextura definidos no projeto de norma ISO/FDIS 13473-5.

- Ltx63 – nível de textura em bandas de oitava com centro a 63 mm;
- Ltx500 – nível de textura em bandas de oitava com centro a 500 mm;
- Lme – nível de textura na gama completa da megatextura (entre 63 mm e 500 mm).

Por ser um parâmetro obtido de forma corrente, considerou-se ainda a profundidade média do Perfil (MPD) obtida de acordo com a norma EN ISO 13473-1: 1997.

Consideração da absorção sonora

Para a medição de absorção foi utilizado um tubo de impedância auto-fabricado com 80 mm de diâmetro e dois microfones (Freitas et al., 2010). Este tubo tem uma extremidade aberta, que é colocada sobre a superfície a ser observada. O coeficiente de absorção apresentado na Figura 2 foi calculado como uma função da impedância acústica ao longo de um intervalo de frequências de 250 Hz a 2,5 kHz (1/3 de oitava).

A frequência onde ocorre o pico de absorção máxima depende da espessura e da porosidade da camada. Em camadas fechadas esse pico ocorre a frequências superiores a 2000 Hz (Raimundo et al., 2010), isto é, em frequências que interferem pouco com a audição humana. Como a localização do pico de absorção é muito variável, caso ocorra dentro dos limites do ensaio, para o parâmetro absorção considerou-se a média dos valores medidos em bandas de 1/3 de oitava entre as frequências de 250 Hz e 2,5 kHz.

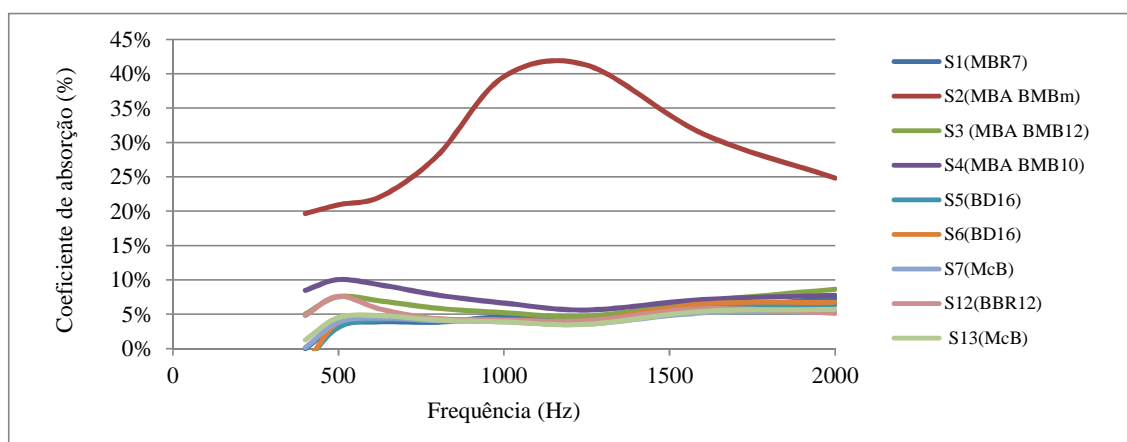


Fig. 2. Espectro de absorção.

Consideração do amortecimento da camada superficial

O amortecimento é uma medida de dissipação de energia de uma estrutura. Este pode ser obtido a partir da função de resposta em frequência (FRF), que é a razão entre uma determinada resposta (saída) medida num ponto i e a excitação (entrada) provocada no ponto j da estrutura, medidas em simultâneo, pelo Método de Largura de Banda (MLB). O MLB pode ser utilizado para estimar as razões de amortecimento modal, num sistema com múltiplos graus de liberdade e com frequências de ressonância bem espaçadas, assumindo que em cada banda de ressonância a resposta é dominada pelo respectivo modo e que a contribuição dos outros modos é irrelevante (Ewins, 2000).

A frequência de ressonância é a frequência a que uma curva de resposta (FRF) atinge um valor máximo local na proximidade de uma frequência natural. Por sua vez, a frequência natural de uma estrutura corresponde a cada modo de vibração da mesma e é nestes modos que a estrutura tende a vibrar naturalmente quando sujeita a uma perturbação ou excitação.

A qualidade da medição pode ser obtida através da função coerência, que representa a relação os sinais de entrada e saída do sistema. A função coerência deve ser calculada para cada aquisição e valores próximos de 1 indicam que o sinal de resposta tem origem na força de excitação, enquanto que valores muito inferiores a 1 indicam que a resposta está contaminada por ruídos ou efeitos de não linearidade do sistema (Ewins, 2000).

Os valores das frequências de ressonância, do amortecimento e a respectiva coerência nas análises, foram obtidos dos espectros de impedância mecânica (FRF), utilizando para o efeito um martelo instrumentado e um acelerômetro. Cada espectro de impedância resultou da média linear de 3 medidas efetuadas no mesmo local da amostra, sendo posteriormente selecionados somente os espectros de impedância com um factor de coerência superior a 95%.

Para cada superfície ensaiada foram determinados os valores médios de amortecimento em cada banda de 1/3 de oitava, apresentados na Figura 3. A partir destes valores foram definidas as curvas de regressão que permitem estimar o amortecimento entre 500 Hz e 3500 Hz.

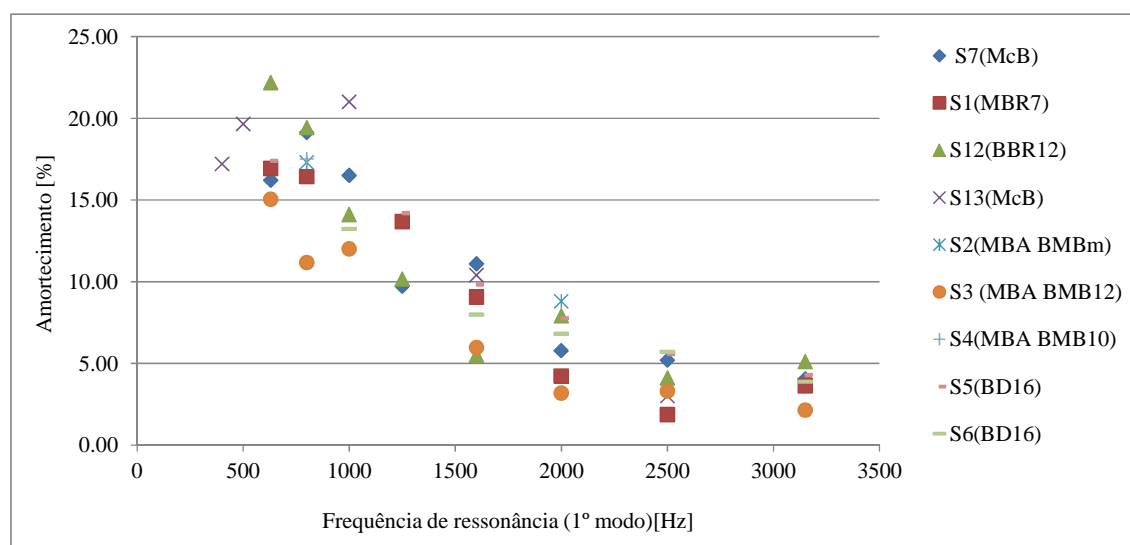


Fig. 3. Amortecimento médio (%), determinado para cada frequência de ressonância em bandas de 1/3 oitava.

Para integração no modelo foram selecionadas s frequências de 800 Hz e 2000 Hz, por se verificar que o comportamento a baixas e altas frequências é diferente e por serem os únicos valores que caracterizam algumas secções, como é o caso da S4. Na Tabela 2 apresenta-se os valores utilizados no modelo.

Tab. 2. Amortecimento calculado a partir das curvas de regressão para as frequências de 800 Hz e 2000 Hz.

Frequência de ressonância	S1 (MBR7)	S2 (MBA BMBm)	S3 (MBA BMB12)	S4 (MBA BMB10)	S5 (BD16)
800 Hz	16.41	17.30	12.39	17.50	16.11
2000 Hz	6.80	8.80	2.07	4.80	6.27

Frequência de ressonância	S6 (BD16)	S7 (McB)	S12 (BBR12)	S13 (McB)
800 Hz	14.69	19.30	18.22	17.41
2000 Hz	7.48	5.77	4.30	8.05

RESULTADOS DOS MODELOS

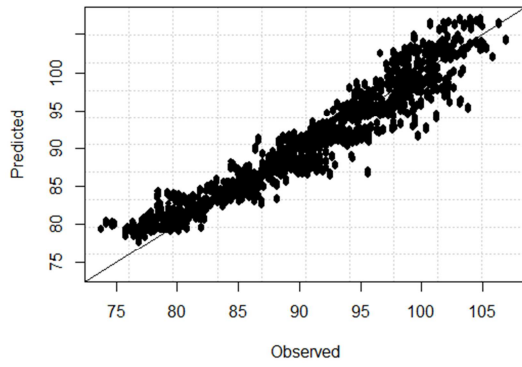
A base de dados utilizada para a modelação contém 1148 observações das 17 variáveis independentes atrás referidas. Na Tabela 3 apresentam-se os valores dos parâmetros de qualidade do ajuste para os quatro modelos selecionados. O modelo MLPE, que recorre a redes neuronais para estabelecer relações entre as variáveis tem o melhor ajuste, uma vez que tem o menor erro absoluto médio (MAE) e explica 96% da variabilidade encontrada. O modelo que apresentou pior desempenho foi o de regressão múltipla (MR), ainda assim, consegue explicar 93% da variabilidade.

Na Figura 4 apresenta-se para cada modelo a relação entre os valores previstos e os valores observados. Nota-se alguma perturbação a níveis de ruído reduzidos, que correspondem a velocidades muito reduzidas, que pode ser explicada pela possível interferência do ruído do motor. Nesta situação os valores previstos são superiores aos observados. A Figura 4 b) corrobora os resultados obtidos para a qualidade do ajuste, uma vez que é a menos dispersa.

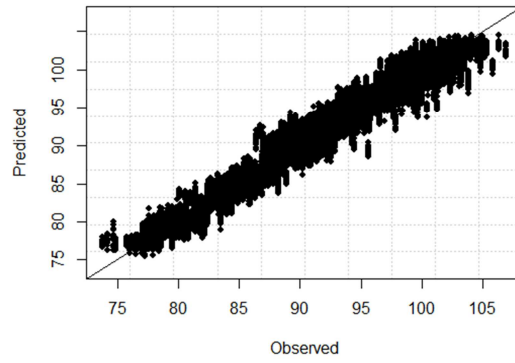
A importância relativa, expressa em termos percentuais, de cada variável em cada um dos modelos é mostrada da Figura 5. A velocidade é a que tem sempre maior importância, aproximando-se dos 45%. Seguem-se as variáveis relativas ao amortecimento, com uma importância próxima dos 10% e da textura Tmean (média das frequências compreendidas entre 31.5-12.5 Hz). As restantes têm importâncias inferiores a 5%.

Tab. 3. Erro absoluto médio e coeficiente de determinação para os modelos testados.

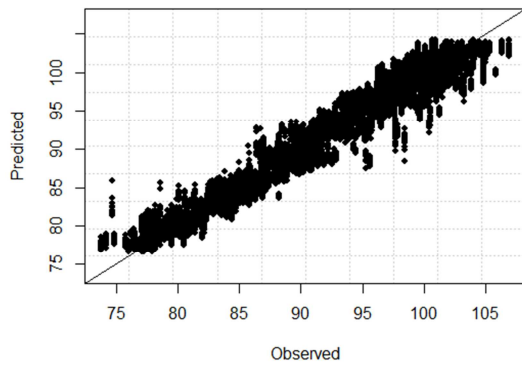
Modelo	Técnica	MAE	R ²
MR	-	1.60	0.93
MLPE	Heuristic10	1.25	0.96
SVM	Heuristic10	1.33	0.95
SVM UD	UD	1.30	0.95



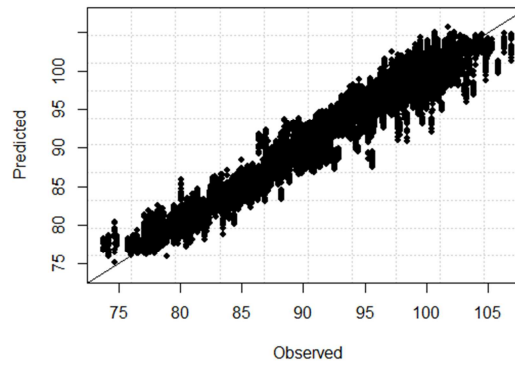
a) Modelo MR



b) Modelo MLPE



c) Modelo SVM



d) modelo SVM UD

Fig. 4. Valores Previstos versus valores observados.

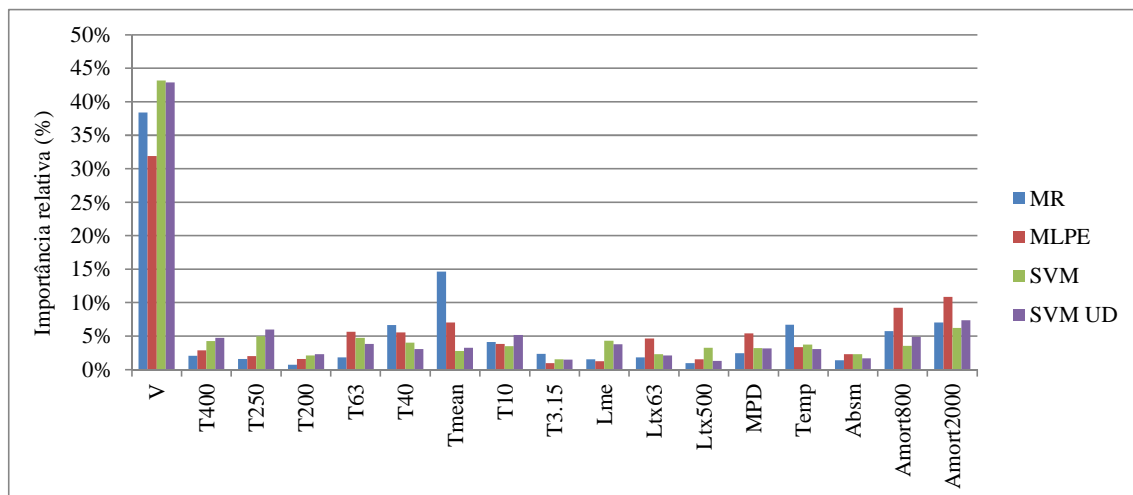


Fig. 5. Importância relativa de cada variável em cada modelo testado.

CONCLUSÕES

Neste trabalho abordou-se de uma forma sucinta os principais modelos de previsão de ruído pneu pavimento existentes e apresentou-se um novo modelo desenvolvido para as condições portuguesas que utiliza técnicas *Data Mining* na sua modelação.

Esta abordagem inovadora tem como vantagens o desenvolvimento de um modelo que parte de dados observados em pavimentos em serviço, como a textura, a absorção sonora e o amortecimento das camadas superficiais dos pavimentos, integra intrinsecamente dados relativos ao veículo de ensaio, e ainda considera o efeito da temperatura.

Foram consideradas 17 variáveis e testados 4 modelos, sendo que o modelo MLPE (*multilayer perceptron ensemble*) que utiliza redes neuronais é o que se ajusta melhor aos dados.

A análise da importância relativa das variáveis mostra que a velocidade é preponderante no modelo e que o amortecimento (indicador da capacidade de uma estrutura dissipar energia) tem uma importância muito superior à das restantes variáveis.

A consolidação desta relação entre o ruído e a resposta a impactos na superfície, como os da passagem dos pneus dos veículos, abre perspectivas no sentido da integração de novos materiais e de novas técnicas construtivas nas camadas superficiais dos pavimentos.

O passo que se segue é a validação do modelo através da comparação dos resultados das medições em campo com os do modelo com base em dados obtidos em amostras produzidas em laboratório e em amostras obtidas em campo.

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi financiado no âmbito do Programa Operacional Temático Factores de Competitividade (COMPETE) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER, através dos projetos FCOMP-01-0124-FEDER-007560 e PEst-OE/ECI/UI4047/2011.

Ao Professor José Dias Rodrigues da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto pelo seu apoio na definição da metodologia de determinação do amortecimento das camadas dos pavimentos.

Ao Professor Paulo Cortez da Universidade do Minho, Departamento de Produção e Sistemas, pelo seu apoio no desenvolvimento do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chen, T; Chang, J.; Chen, D. (2008). Applying Data Mining Technique to compute LDE for rutting through full scale accelerated pavement testing. *Road Materials and Pavement Design*. Volume 9, N.º 2, pp227-246.
- Cortez P (2010) Data mining with neural networks and support vector machines using the R/rminer tool. In: Perner P (ed), *Advances in data mining. Applications and theoretical aspects. Proceedings of 10th industrial conference on data mining, Lecture Notes in Computer Science*, Springer, Berlin, pp 572–583.

- DEUFRAKO (2009). Prediction and Propagation of Rolling Noise, Final Report.
- Ewins (2000). Modal Testing: Theory, Practice and Application, Research Studies Press Ltd., UK.
- EN ISO 13473-1:1997. Characterization of pavement texture by use of surface profiles -- Part 1: Determination of Mean Profile Depth.
- Freitas, E.; Raimundo, I.; Inácio, O; Pereira, P., (2010). In situ assessment of the normal incidence sound absorption coefficient of asphalt mixtures with a new impedance tube. 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2010, Lisbon.
- Freitas, E.; Machado, P., Raimundo, I. (2012). Caracterização do ruído pneu-pavimento nas estradas portuguesas. Seminário Gestão da velocidade e do ruído rodoviário, 29 e 30 de maio.
- ISO/FDIS 13473-5:2008. Characterization of pavement texture by use of surface profiles -Part 5: Determination of megatexture.
- Kumar, K.; Parida, M. and Katiyar, V. (2012). Road Traffic Noise Prediction with Neural Networks-A Review. An International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications, Vol.2, No.1, pp.29-37.
- Larsson K. (2002). Modelling of dynamic contact – exemplified on the tyre-road interaction. PhD Thesis, Department of applied acoustics, Calmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
- Raimundo, I.; Freitas, E.; Inácio, O; Pereira, P., (2010). Sound absorption coefficient of wet gap graded asphalt mixtures. 39th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering - INTER-NOISE 2010, Lisbon.
- R Development Core Team (2010) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org>, ISBN 3-900051-00-3.
- Sandberg U., Ejsmont J. (2002). Tire / Road Noise Reference Book, Informex SE – 59040, Kisa, Sweden (www.informex.info).

NOISE PERCEPTION, PSYCHOACOUSTIC INDICATORS, AND TRAFFIC NOISE

Catarina Mendonça

Centro Algoritmi, Universidade do Minho, Centro de Computação Gráfica, Guimarães

E-mail: Catarina.mendonca@cgc.pt

ABSTRACT

We present an overview of sound characteristics, noise and noise perception. Several sound measures, weightings and psychoacoustic parameters are discussed and compared. Finally, we present some data comparing several psychoacoustic measures and their predictability of traffic noise annoyance and vehicle detection. We propose loudness measures according to Zwicker as a standard for environmental noise assessment, in detriment of the widely accepted A-weighted Leq.

Keywords: Psychoacoustics, Loudness, Sharpness, Roughness, L_{Aeq} , Leq, Annoyance

INTRODUCTION

Noise and Sound

Noise is among the most prominent forms of pollution in the industrialised and developing regions. This form of pollution can affect people in several physical, psychological and social dimensions, namely by causing auditory lesions, stress, annoyance, distraction, tiredness, or simply by impairing social communication (e.g. Gorai and Pal, 2006; Passchier-Vermeer and Passchier, 2000; Sanz et al, 1993; Freitas et al., 2012).

Physically, noise is a complex stimulus made of several mechanical vibrations or pressure fluctuations that are disseminated in elastic means. Perceptually, when these vibrations reach the human ear, and if they are within the audible frequencies, they will cause nerve excitation and thus produce the mental representation of sound. The auditory representation of a sound depends on specific physical parameters, namely frequency, period, and amplitude.

The frequency of a periodic phenomenon, such as a sound wave, is the number of times that the phenomenon repeats itself in a time interval. In acoustics, it is often defined as the number of times the pressure varies around the atmospheric pressure in one second, and it is expressed in Hertz (Hz). Period is defined as the total amount of time it takes for one sound wave to complete a full cycle. The frequency span for auditory sound processing in normal listeners is between 20 and 20.000 Hz. Lower frequency sounds lead to low pitch sensations and high frequency sounds lead to high pitch sensations. The frequency of a sound is relevant for environmental noise assessments, as higher pitch sounds are considered more annoying and more disruptive than lower pitch sounds. In natural environments, however, pure tone sounds (with only one sine wave) are never found. Instead, several sound waves interact and reach the ear simultaneously, influencing the perceived timbre or sound quality. Environmental sounds can therefore be analysed by decomposing them into separate waves or simple harmonics, namely through Fourier analyses.

The last perceptually relevant physical attribute of a sound stimulus is its amplitude. Amplitude consists in the maximum vertical variation of the sine wave relative to its equilibrium point. In sound, it is the maximum difference in pressure level relative to the static pressure level, or half the total variation in pressure during a sine cycle. Perceptually, the larger the amplitude, the larger the subjective sound intensity or loudness. Sound intensity perception, however, is not as simply obtained. Because of the characteristics of the auditory system, there is a different reaction for each frequency according to each sound pressure level.

SOUND AMPLITUDE AND LOUDNESS

Sound pressure variations caused by a sound wave vary across a large scale. In audio, sound pressure (p) is expressed by the SI unit pascal (Pa). To obtain a more manageable pressure level unit, the decibel (dB) scale is used, which is a logarithmic compression indexed to pascal levels. Several studies have been conducted to analyse the effect of sound level on the subjective sound level. In pioneering works, Fletcher and Munson (1933) chose to measure the audible level of any sound by comparing it against a 1000 Hz pure tone. The loudness of the compared sound was adjusted until, on the average, it was judged to be as loud as the reference. Then, the level of the 1000 Hz tone in dB is called the “loudness level” of the sound being measured, expressed in “phons”. From this procedure, the authors obtained estimations of equal-loudness contours for each frequency, which are the base of loudness scales and weightings. The unit of loudness, called a “sone”, is defined as loudness corresponding to a 1000 Hz tone 40 dB above the listener’s threshold (Bauer and Torick, 1966). The A-weighting scale, a standard for environmental noise assessment, is based on the equal-loudness contour for the lowest sound levels. For extremely soft sounds (20 phon), there is a fair agreement between A-weighting and the equal loudness contour. At higher levels, e.g. 80 phon, the attenuation of the A-weighting curve at low frequencies is much too high in comparison with the corresponding equal loudness contour (Festl, 1997). This means that for every-day sounds, A-weighting underestimates the loudness of their low frequency components. Another draw-back of A-weighting is that it does not consider the dependence of loudness on bandwidth: the loudness of broadband sounds is systematically underestimated.

The spectral effects of loudness can be assessed by a multi-channel analysis. Usually three procedures for physical loudness measurements are considered:

- a) The procedure by Stevens (1956), which was originally based on octave-band analysis of the sounds;
- b) Kryter’s (1959) procedure, based on 1/3 octave-band analysis and useful for aircraft noise ;
- c) Zwicker’s procedure, based on 1/3 octave-band analysis and predictive of all noise types, as well as music and speech.

The most important feature of Zwicker’s loudness model is that the area under the specific loudness curve is always directly proportional to the perceived loudness. Due to its robustness, this loudness assessment procedure has been standardized in several sound level meters and computer programs.

Moore and Glasberg (1997) proposed a correction to Zwicker’s loudness, which is based on the assumption that the transfer characteristics of outer and middle ear are reflected by the 100-phon equal-loudness counter, rather than by the absolute threshold curve. They assumed that the absolute threshold curve below 1000 Hz is highly determined by the internal noise in the cochlea rather than by the transfer characteristics of the outer and middle ear.

Despite such deterministic approaches to loudness assessment, one final remark should be stressed about its subjective nature. The final perceived sound intensity, or “sensory loudness”, is a complex product also integrating emotional factors and psychological conditioning (Bauer and Torick, 1966). For instance, a person shouting seems louder than a person talking, even when both sounds are equalized in wave amplitude. Next, we will approach other measures that intended to better capture the sound quality or pleasantness.

OTHER PSYCHOACOUSTIC MEASURES

Two other common psychoacoustic measures are sharpness and roughness. Sharpness is a psychoacoustic measure sometimes used in assessing sound quality. Sharpness is a hearing sensation related to frequency. It relates to the sensation of a sharp, high-frequency sound and is the comparison of the amount of high frequency energy to the total energy. This algorithm normalizes the specific loudness spectrum by the total loudness and weights the spectrum according to frequency. The algorithm returns the frequency-weighted result as the specific sharpness versus critical band rate and then integrates the specific sharpness to measure the sharpness. Higher frequency components in the signal generally result in higher sharpness measurements. Roughness is related to sensory dissonance (Parncutt, 1989). It is the beating sensation produced by the interaction of two or more components that are sensed within a certain distance in the inner ear. This distance is referred to as “critical bandwidth” and varies with frequency. According to Parncutt, to calculate the degree of roughness between two pitches, we must first calculate the critical bandwidth for the area around the mean frequency. We then define the roughness as the sum of the roughness of each pair of components.

Recently, Fastl and Zwicker (2007) suggested another psychoacoustic approach: Sensory pleasantness. This approach to sound quality was proposed as a more complex sensation that is influenced by elementary auditory sensations such as roughness, sharpness, tonality, and loudness. They presented a model of weighted estimations of each factor, but such approach still lacks sustained empirical support.

ENVIRONMENTAL NOISE AND VEHICLE DETECTION

Environmental noise assessment is often conducted with a sound level meter. As noise needs to be integrated in time, its measures are often expressed in L_{eq} .

L_{eq} is best described as the average sound level over the period of measurement. It is usually measured A-weighted and hence expressed in L_{Aeq} . As the L_{eq} (defined as the Equivalent Continuous Sound Level) is an average, it is settled to a steady value, making it easier to read accurately than with a simple instantaneous Sound Level. Being an average, it also shows the total energy of the noise, so it is a better indicator of potential hearing damage or the likelihood that the noise will generate complaints. The L_{eq} is the main parameter for most serious applications. It is essential for most noise at work assessments and is also the main parameters used for environmental assessments.

In the next section we present some results from traffic noise recordings, noise values, psychoacoustic analyses and their relation to traffic sound annoyance and vehicle detection.

METHODS

Participants

Eighty-nine participants were recruited from educational and social institutions (7-86 years old, average 36.68, SD 22.12). Split into age groups, 26 participants were juvenile (19 years and below, average 12.93, SD 2.31), 27 were early adults (20-39 years, average 27.98, SD 5.33), 19 were middle adults (40-59, average 50.51, SD 5.94) and 17 late adults (60 years and above, average 71.35, SD 6.96). To exclude prior major hearing deficiency all participants underwent audiometric screening tests (250, 1000 and 4000 Hz).

Stimuli and equipment

To record the tyre-noise samples, the selected pavement surfaces for this study were: cobble stones, dense asphalt, and open graded asphalt rubber. The vehicles were a small passenger car (Wolkswagen Polo), a hybrid (Toyota Prius), and a pickup truck (Mitsubishi Strakar). Both the representative sections of the road surfaces and the recording techniques were selected according to the European ISO Standard 11819-1:1997. The controlled pass-by method (CPB) was used, with each single vehicle tyre-road noise recorded with speeds of 30, 40 and, 50 Km/h.

The tyre-road noise was binaurally recorded with a Brüel & Kjaer Head and Torso Simulator (HATS) type 4128-C, a Brüel & Kjaer Pulse Analyzer type 3560-C and the Pulse CPB Analysis software. The noise samples were recorded with the HATS at 7.5 meters from the road centre and at a height of 1.7 meters (for methodological details see Freitas et al., 2012).

From each single vehicle recording, sound samples with a duration of 2 seconds were produced. For all sound samples the final Time-to-Passage (TTP) of the approaching vehicle was fixed to 3.5 seconds; i.e. at the end of the stimulus presentation the vehicle would need 3.5 seconds to cross the line of sight of the observer. To mask the signal (tyre-road sound) five levels of white noise were generated with WaveLab 6: -40, -35, -30, -25 and -20 dBv, corresponding to the LAeq (dBA) values, as listened by the participants, of 62, 67, 72, 77 and 82, respectively. A total of 135 stimuli with signal plus noise were generated with audio software (Ardour): 3 pavements x 3 vehicles x 3 speeds x 5 noise levels.

The stimuli were listened through a computer with a sound card Intel 82801BA-ICH2, a custom built C++ application, and AKG K 271 MKII closed headphones. This system was calibrated to achieve sound pressure levels identical to those recorded in the real scenarios. The values of Loudness were assessed with the Pysound3 application (Cabrera, Ferguson, Rizwi and Schubert, 2008).

PROCEDURE

Annoyance experiment

The annoyance assessment of each participant was performed in a quiet room. All 30 stimuli were also presented channel reversed to avoid interaural biases. The resulting 60 samples were repeated twice (trials). Thus each participant listened to a total of 120 noise trials (30 stimuli x 2 channel sequences x 2 trials). Trials were presented in a pseudo-random order (method of the constant stimulus) to reduce anticipation and expectation interferences. Participants were requested to assess the annoyance of each

noise trial with a 10-graded interval scale from 1 (less annoying) to 10 (very annoying). The interval between trials was variable and depended on the promptness of the participant: after the answer to a given trial (by pressing a number on a keyboard) the next noise sample was presented. Each session, with the 120 trials, lasted for about 14 minutes per participant.

Vehicle detection experiment

Within each trial the participant was presented with two consecutive sound samples, with a fixed gap of 1 second, one with the signal (approaching vehicle) plus noise and the other with only noise. Both noise backgrounds of each trial had the same level of white noise. The 135 trials were presented in a pseudo-random order (method of constant stimulus). Participants were requested to detect in which of the intervals, i.e., first or second sample, was the approaching vehicle (two-interval forced choice, 2IFC). To avoid biased answers from participants the left-right orientation of the approaching vehicle and the order of intervals were randomized across the 135 trials.

RESULTS

Annoyance and acoustic indicators

To understand, predict and compare how the different pavements impact annoyance ratings, several acoustic measurements were evaluated, namely LAeq, LMax, Loudness (Zwicker), Roughness and Sharpness. In Figure 1, LAeq analyses are presented. The pooled annoyance results for all pavements are well predicted by the LAeq ($r^2=0.81$, slope 0.38). A similar trend occurs with the separate results of cobble stones ($r^2=0.98$, slope 0.32), dense asphalt ($r^2=0.90$, slope 0.40) and open asphalt rubber ($r^2=0.73$, slope 0.39).

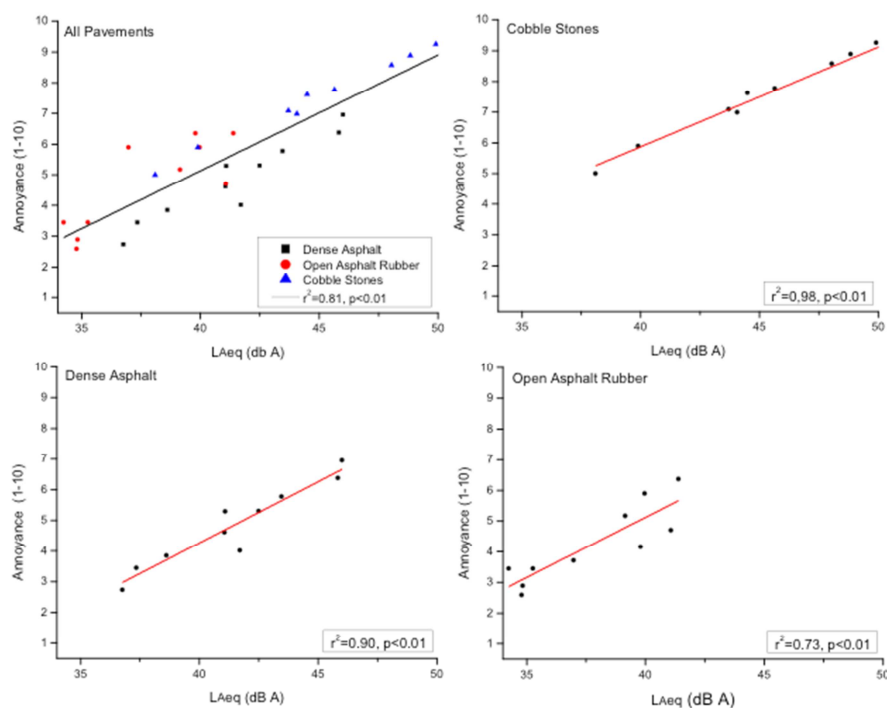


Fig. 1. Linear regressions of LAeq values and the corresponding annoyance rates for all pavements, the cobble stones, the dense asphalt and the open asphalt rubber pavements (384 trials per dot).

L_{Amax} results are not as consistent as the L_{Aeq} ones (Figure 2). The linear regression for all pavements has a low adjustment ($r^2=0.32$, slope 0.27), mainly due to the disparity in values of the different pavements. Taken separately, the dense asphalt pavement result do not correlate with L_{Amax}, while the cobble stones show a weak interaction ($r^2=0.43$, slope 0.37) and the open asphalt rubber ($r^2=0.73$, slope 0.33) obtains a value equal to that obtained with L_{Aeq}.

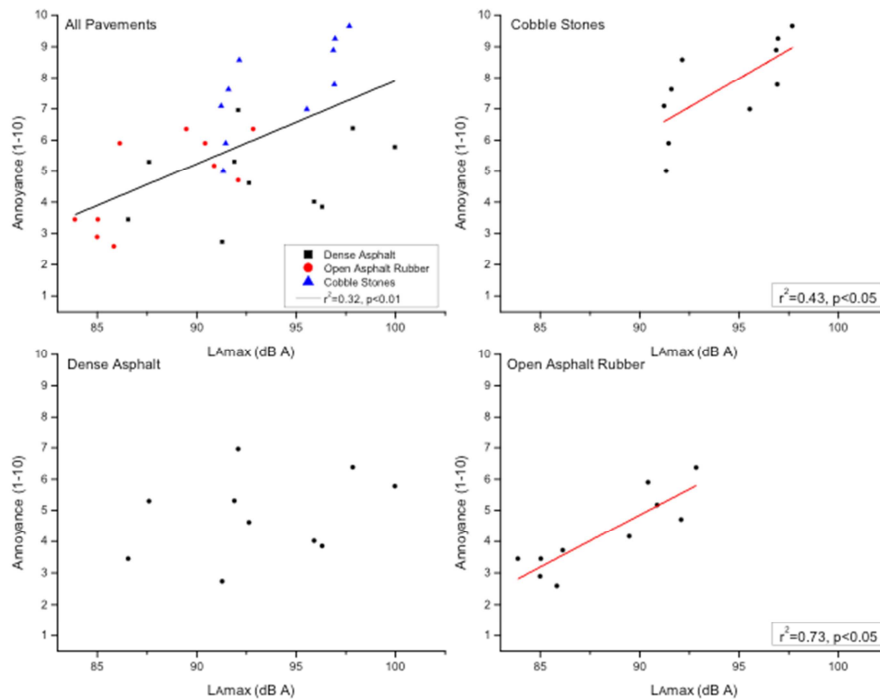


Fig. 2. Linear regressions of L_{Amax} values and the corresponding annoyance rates for all pavements, the cobble stones, the dense asphalt and the open asphalt rubber pavements (384 trials per dot).

The Loudness analysis reveals the best fitting results (Figure 3). Loudness explains well the annoyance ratings for the pooled data of all pavements ($r^2=0.87$, slope 3.08). Considering each pavement separately, only the cobble stones ratings correlate slightly worse with Loudness ($r^2=0.95$, slope 2.38) than with L_{Aeq}. Both the dense asphalt ($r^2=0.97$, slope 3.78) and the open asphalt rubber ($r^2=0.96$, slope 2.34) annoyance are best predicted by Loudness than by L_{Aeq}.

Sound Roughness does not explain annoyance as well as Loudness or L_{Aeq}. When plotted against all pavement values, roughness obtains a weaker regression ($r^2=0.6$, slope 31.01). Roughness does not explain the annoyance ratings of the cobble stones stimuli ($r^2=0.22$, n.s.), but it still has some predictability for dense asphalt ($r^2=0.49$, slope 117.68) and even more for open asphalt rubber ($r^2=0.74$, slope 86.42). It is noteworthy that Roughness values clearly distinguish the cobble stones pavement from both the dense asphalt and the open asphalt rubber. The first reveals consistently higher Roughness levels, whereas the others have very similar values and overlap in the pooled plot (Figure 4).

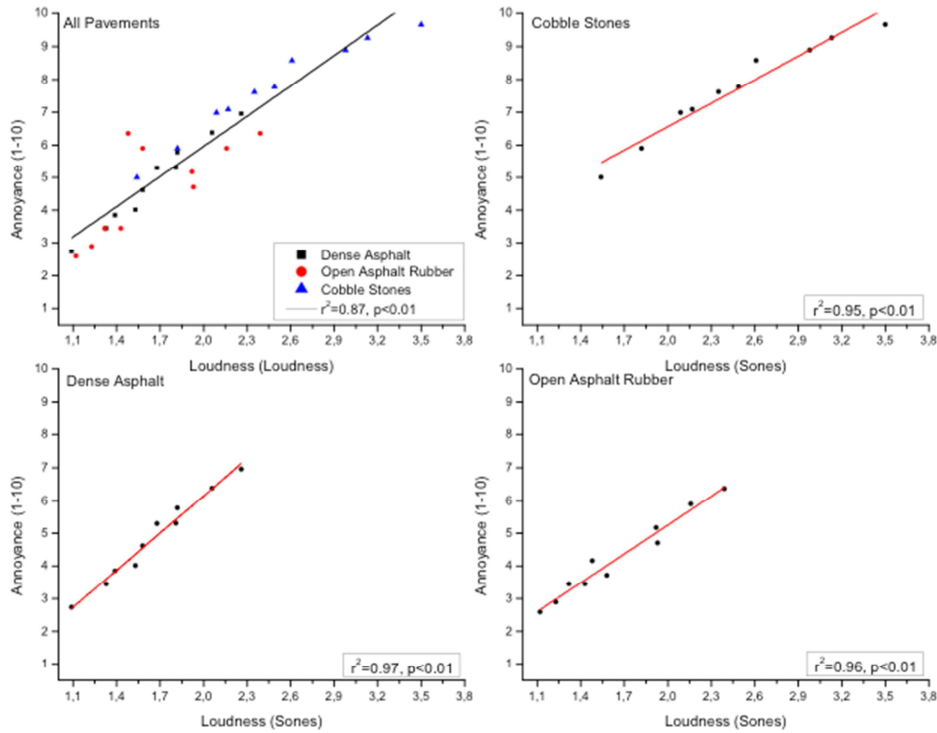


Fig. 3. Linear regressions of Loudness values and the corresponding annoyance rates for all pavements, the cobble stones, the dense asphalt and the open asphalt rubber pavements (384 trials per dot).

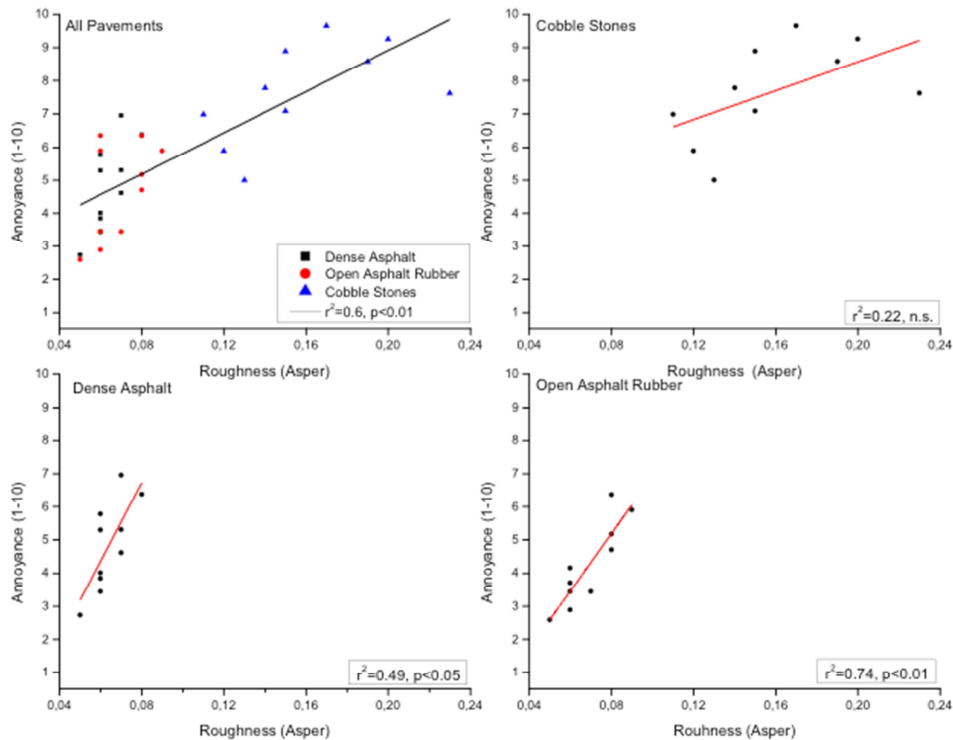


Fig. 4. Linear regressions of Roughness values and the corresponding annoyance rates for all pavements, the cobble stones, the dense asphalt and the open asphalt rubber pavements (384 trials per dot).

Sharpness analysis was also conducted, although linear regression analyses show barely no interaction between this psychoacoustic factor and annoyance (Figure 5). Again, dense asphalt and open asphalt rubber overlap in values and they are not predicted by Sharpness. Interestingly, as opposed to the Roughness interactions, here only cobble stones has a clear relation with Sharpness ($r^2=0.78$, slope 49.6).

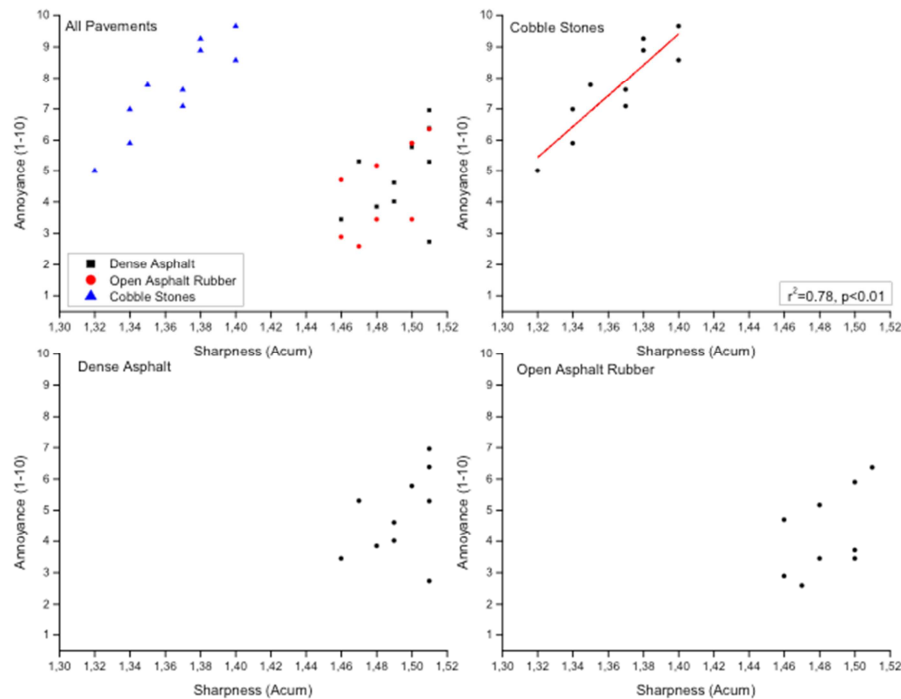


Fig. 5. Sharpness values and the corresponding annoyance rates for all pavements, the cobble stones, the dense asphalt and the open asphalt rubber pavements (384 trials per dot).

In sum, several acoustic properties of the tyre-road noise show an interaction with the annoyance ratings. LAeq correlates well with the results, but Loudness is the one that best predicts traffic annoyance. Interestingly, not all factors interact equally with each pavement. L_{Amax} values do not predict the dense asphalt annoyance ratings. Roughness might have a relation with dense asphalt and open asphalt rubber pavement noises, but not with cobble stones. Conversely, Sharpness relates with cobble stones traffic annoyance, but it does not predict either dense asphalt or open asphalt rubber results.

VEHICLE DETECTION

In order to analyse the interactive effect between vehicle sound and environmental sound, we addressed the traffic detection in light of a signal-to-noise perspective. In this perspective we intended to focus the ratio between the actual traffic signal and the background noise, aiming to find the relation between this ratio and actual vehicle detection.

Several preliminary analyses showed that the best acoustic indicator was Loudness, compared to L_{Aeq} and L_{Amax}. There were no interactions neither with Sharpness nor with Roughness indicators. In Loudness, the best detection prediction was obtained by plotting the maximum Loudness (dBA) from the final 250ms of the stimulus sounds against the average background noise (dBA). Therefore, the

signal-to-noise ratio here presented was computed as $SNR=fS/N$, where fS stands for final sound level and N stands for mean Noise level (dB A). The scatter plot of all SNRs against detection accuracy levels is presented in Figure 6.

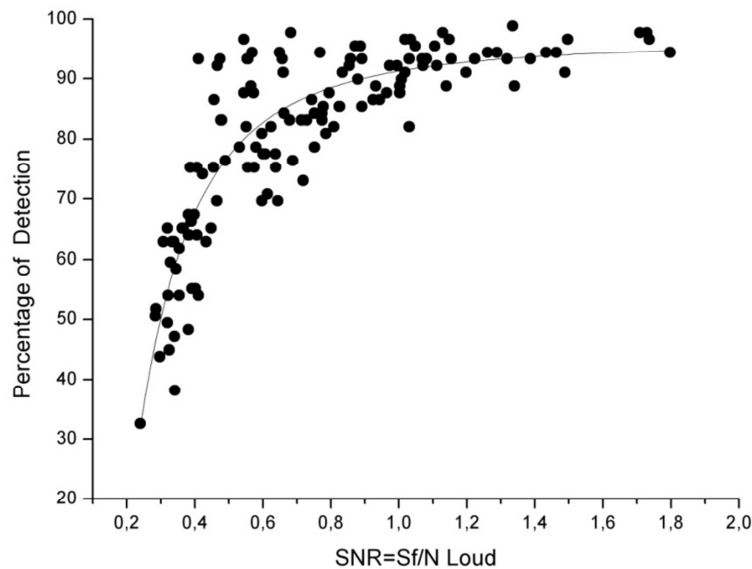


Fig. 6. The signal-to-noise ratio (dB A) against accurate detection levels.

Several data fitting methods were tested, to predict how both the SNR and the detection levels interact, namely linear, polynomial and logistic fits. The best correlation was obtained with a logistic fit: $r^2=0.77$, $p<0.001$.

To analyse how pavement and vehicle type affected the SNR detection values, we plotted each variable separately. Vehicle type was well distributed across the plot, but not pavement type. Curve fitting for each separate pavement variable was performed. We found a significant linear correlation between the asphalt rubber pavement ($r^2=0.79$, $p<0.001$) and the dense asphalt ($r^2=0.75$, $p<0.001$), but not for the cobble stones ($r^2=0.22$, n.s.). It was the logistic fit that provided the best result prediction for each variable, as seen in figure 8, asphalt rubber obtaining a correlation of $r^2=0.86$ ($p<0.001$) and dense asphalt of $r^2=0.83$ ($p<0.001$). There was no significant interaction between the cobble stones pavement and the detection levels. This result highlights the specific properties each pavement type and suggests that each variable should be analysed separately.

CONCLUSION

Finally, it is demonstrated that traffic-related annoyance and detection is best predicted by Loudness indicators. Other sound measures might correlate with annoyance, but not as robustly across all pavement types. A similar effect is found for vehicle detection. Crucially, each pavement is differently predicted by the psychoacoustic values, revealing different timbre characteristics which are still not well represented in common psychoacoustic algorithms.

Future studies should consider this measure as a standard for tyre-road noise analysis.

REFERENCES

- Bauer, B.B., Torick, E.L. (1966). Researches in loudness measurement. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, AU-14(3), pp. 141-151.
- Fastl, H. (1997). The psychoacoustics of sound-quality evaluation. *Acustica united with Acta Acustica*, 83, pp. 754-764.
- Fastl, H., Zwicker, E. (2007). Sharpness and sensory pleasantness. In *Psychoacoustic Facts and Models*, Springer-Berlin Heidelberg, pp. 239-246.
- Fletcher, H., Munson, W.A. (1933). Loudness, its definition, measurement and calculation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 5, pp. 82.108.
- Freitas, E., Mendonça, C., Santos, J.A., Murteira, C., Ferreira, J.P., 2012. Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels. *Transportation Research Part D*. 17, 321-326.
- Gorai, A.K., Pal, A.K., 2006. Noise and its effect on human being - a review. *Journal of Environmental Science and Engineering* 48(4), 253-260.
- Kryter, K. D. (1959). Scaling human reactions to the sound from an aircraft. *Journal of the Acoustical Society of America*, 31(11), pp. 1415-1429.
- Moore, B.C.J., Glasberg, B.R., Baer, T. (1997). A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness. *Journal of the Audio Engineering Society*, 45(4), pp. 224-240.
- Parncutt, R. (1989). *Harmony: A psychoacoustical approach*. Springer-Verlag: Berlin.
- Passchier-Vermeer, W., Passchier, W.F., 2000. Noise exposure and public health. *Environmental Health Perspectives* 108(1), 123-131.
- Sanz, S.A., Gracia, A.M., & Garcia, A., 1993. Road traffic noise around schools: a risk for pupils performance? *International Archives of Occupational and Environmental Health* 65, 205-207.
- Stevens, S. S. (1956). Calculation of the loudness of a complex noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28, pp. 807-832.
- Zwicker, E. (1977). Procedure for calculating loudness of temporally variable sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 62(3), pp.675-682.

TYRE-ROAD NOISE: ANNOYANCE AND DETECTION OF INCOMING TRAFFIC

Jorge A. Santos

School of Psychology, Department of Basic Psychology, University of Minho, Portugal

Centro Algoritmi, University of Minho, Portugal

Centro de Computação Gráfica, Portugal

Email: jorge.a.santos@psi.uminho.pt

ABSTRACT

In this paper, annoyance ratings and detection thresholds of incoming traffic are discussed as a function of road-tyre noise. Empirical data on annoyance, from the Noiseless project, can be interpreted as follows: (1) cobble stones pavements were significantly the most annoying; (2) the open asphalt rubber pavement had lower annoyance ratings but it did not differ significantly from the dense asphalt; (3) increasing speeds and traffic densities always led to higher annoyance ratings. On the other hand, as far as safety and detection of incoming traffic is concerned: (1) the hybrid vehicle was the least detected whereas the pickup truck was the most detected; (2) a clear effect of pavement type was found, with less detections for the asphalt rubber pavement while the cobble stones pavement always provided good detection.

Practical implications for traffic noise abatement and the possible trade-off for road safety (vulnerable road users) will be outlined.

INTRODUCTION

Traffic related noise is nowadays the major source of environmental noise in most industrialized nations and developing regions. The negative impact of such noise has been demonstrated in work, educational, social and private contexts.

In a foreseeable future we might expect a significant reduction of road traffic noise both through the use of more efficient pavements and because of the growing popularity of hybrid and full electric vehicles.

However, in urban areas traffic noise could also be a key factor for the awareness of imminent conflicts by vulnerable road users. Therefore, due to traffic noise abatement, we might face in the near future an increasing trade-off between the general improvement of population's health and the increase of accidents involving vulnerable road users.

This paper focuses on two main practical questions:

- 1) is there a clear improvement of urban road networks (i.e., lower annoyance rates) with new pavements, as the open graded asphalt rubber over traditional ones? And could we find further practical implications from the study of other variables such as population age groups, traffic speed or traffic density composition?

- 2) might we face in the near future an unexpected and unwanted outcome of traffic noise abatement, with increasing traffic conflicts and accidents involving vulnerable road users? And what might be the negative outcome as a function of pavements, type of vehicles and population age groups?

For more detailed analyses of these issues please refer to Freitas & al. (2012) and Mendonça et al. (in preparation). For methodological aspects of noise recording, sample noise compositions and psychoacoustic variables, please check previous presentations from Elisabete Freitas and Catarina Mendonça.

MATERIALS AND METHODS

Experiment 1: Annoyance

Ninety-six listeners participated in the experiment (7-86 years old, average of 37 years old). Considering age span, 26 participants were juvenile (19 years and below), 32 early adults (20-39 years), 18 middle adults (40-59) and 20 late adults (60 years and above).

The single vehicle recordings were factorially paired by audio software (Ardour) to produce the stimuli for the annoyance assessment. For each pavement type (cobble stones, dense asphalt, and open graded asphalt rubber) and vehicle speed, from 30 to 70 Km/h with 10 Km/h increments, two traffic density compositions were defined (simulating a 2X1 road). Traffic composition 1 (TC1) had a total of 5 vehicles (3 small passenger cars, 1 hybrid and 1 pickup truck) spaced 2.5 seconds from each other. Traffic composition 2 (TC2) had a total of 15 vehicles (9 small passenger cars, 3 hybrids, 3 pickup trucks) spaced 1 second from each other. Therefore there were a total of 30 stimuli (3 pavements x 5 speeds x 2 traffic compositions). Each stimulus had the duration of 5 seconds.

The stimuli were presented through a custom built C++ application, running in a computer with a sound card Intel 82801BA-ICH2, and AKG K 271 MKII closed headphones.

Each participant listened to a total of 120 noise trials. Participants were requested to assess the annoyance of each noise trial with a 10-graded interval scale from 1 (less annoying) to 10 (very annoying).

Experiment 2: Detection

Eighty-nine participants were tested in this experiment (7-86 years old, average of 37 years old). Split into age groups, 26 participants were juvenile (19 years and below), 27 were early adults (20-39 years), 19 were middle adults (40-59) and 17 late adults (60 years and above). While not entirely overlapping, this sample was composed by participants who were also tested in experiment 1.

From each single vehicle recording, sound samples with a duration of 2 seconds were produced. For all sound samples the final Time-to-Passage (TTP) of the approaching vehicle was fixed to 3.5 seconds; i.e. at the end of the stimulus presentation the vehicle would need 3.5 seconds to cross the line of sight of the observer. To mask the signal (tyre-road sound) five levels of white noise were generated with WaveLab 6: corresponding to the LAeq (dBA) values, as listened by the participants, of 62, 67, 72, 77 and 82, respectively. A total of 135 stimuli with signal plus noise were generated with audio software (Ardour): 3 pavements x 3 vehicles x 3 speeds (30, 40 and 50 Km/h) x 5 noise levels.

The general experimental setup and equipment were the same as the experiment 1.

Within each trial the participant was presented with two consecutive sound samples, with a fixed gap of 1 second, one with the signal plus noise and the other with only noise. Both noise backgrounds of each trial had the same level of white noise. Participants were requested to detect in which of the intervals, i.e., first or second sample, was the approaching vehicle.

RESULTS

Experiment 1: Annoyance

A preliminary analysis of the data, intra and inter-participants, revealed a high consistency of annoyance rates as a function of the main variables (pavement, speed and traffic composition). The results were also similar across all age groups: the juvenile had a mean annoyance of 5.59 (SD 0.70); the early adults had a mean of 5.79 (SD 0.84); middle adults had 5.47 (SD 0.84); and late adults had 5.60 (SD 0.80).

The pooled data per pavement (n=3840 trials) points to a small difference of mean annoyance between the dense asphalt (mean 4.8, SD 2.1) and open asphalt rubber (mean 4.4 ,SD 2.1) pavements. The cobble stones pavement induces the highest rate of annoyance (mean 7.7, SD 2.1). Percentile 85 indicates the same trend with annoyance values of 7 for both dense asphalt and open asphalt rubber, and 10 for the cobble stones pavement.

Cumulative frequencies analysis also suggests that annoyance accumulates with a steep slope for the cobble stone pavement, while both the dense asphalt and the open asphalt rubber pavements follow a smoother and similar path (see Figure 1).

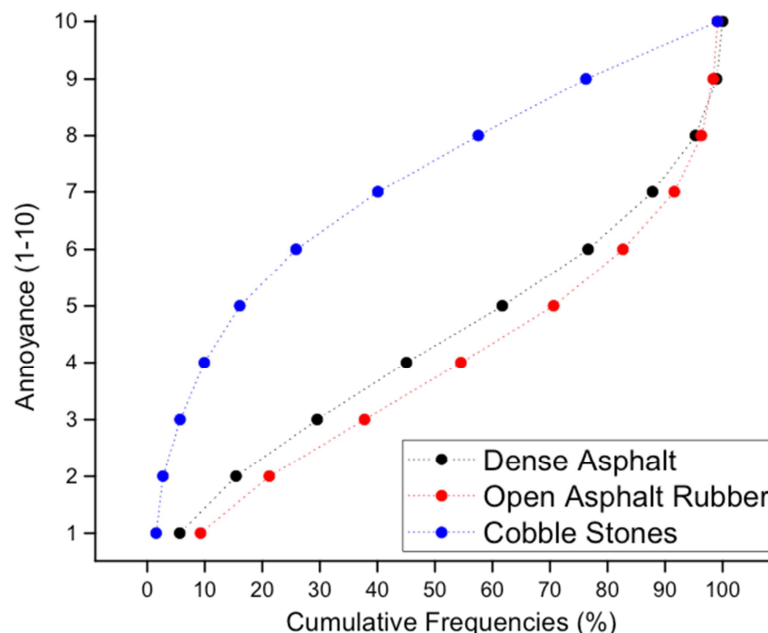


Fig.1. Cumulative frequencies for the dense asphalt, open asphalt rubber, and cobble stones (pooled data n= 3840 per pavement) and annoyance assessment.

The analysis of the speed-pavement interactions reveals a linear increase of the mean annoyance as a function of speed (see Figure 2) with similar slopes for all pavements (cobble stones=0.07, dense asphalt=0.06, open asphalt rubber=0.05). Again, as found in the previous global analysis, the cobble stones pavement shows the highest rates of annoyance. The dense asphalt and open asphalt rubber pavements have similar rates (mean differences not exceeding 0.5); but with a consistent lower level of annoyance for the open asphalt rubber pavement.

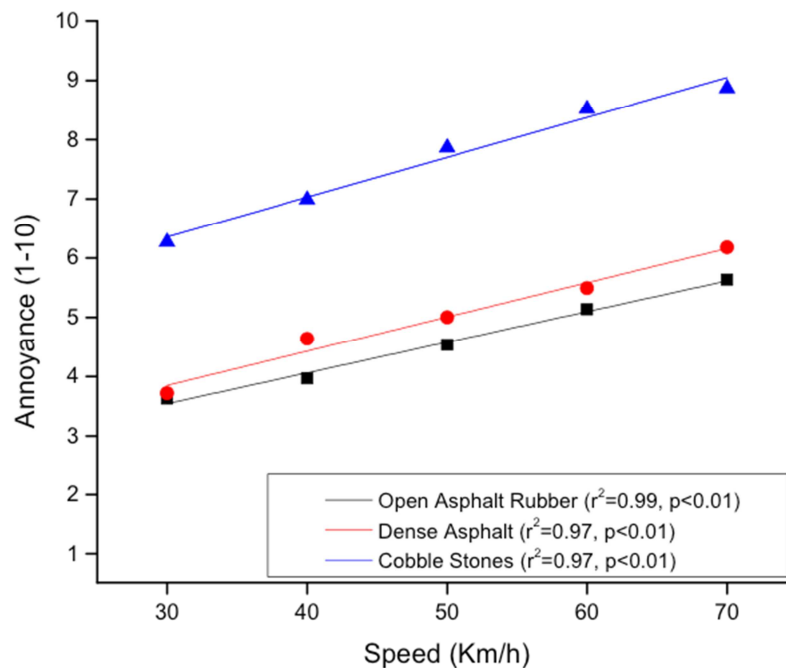


Fig. 2. Annoyance results per speed and pavement: mean values and linear regressions (pooled data n= 768 per dot).

In a similar way as found for the traffic speed, the traffic density composition also had an effect over annoyance rates for all pavements, with an increase of the mean annoyance as a function of the density. In line with both the global analysis per pavement and the speed-pavement results, the cobble stones pavement shows the highest rates of annoyance with mean values of 6.8 and 8.5 for the first (TC1) and second (TC2) traffic compositions, respectively. The dense asphalt and open asphalt rubber pavements have again very close mean rates with mean differences not exceeding 0.6 for TC1 (4.0 and 3.4 respectively) nor for TC2 (5.7 and 5.3 respectively). The analysis of percentile 85 reveals identical patterns of annoyance variation and magnitude. For the cobble stones pavement, the values are of 9 and 10 for TC1 and TC2, respectively. For the other pavements, the percentile values are of 6 and 8 for the dense asphalt, and of 5 and 7 for the opens asphalt rubber.

Summarizing, all age groups rate traffic noises according to the same standards. Cobble stones pavement lead to more annoying traffic noises than dense asphalt and open asphalt rubber. Open asphalt rubber noise is consistently less annoying than dense asphalt, but these differences are of low magnitude and are not significant (Freitas & al., 2012).

Vehicle speed has a strong relation with annoyance for all pavement types. Traffic composition also has a clear effect over results, with higher density traffic scenes consistently leading to higher annoyance rates.

Experiment 2: Detection

Unlike was found in experiment 1, here a preliminary analysis of the data, after computing detection thresholds per participant, revealed clear differences as a function of age. The global mean detection was of 80.51 % and the standard error (SE) of 1.09. The results across age groups were: for juvenile a mean of 78.27% (SE 2.07); for early adults 87.93% (SE 1.34); for middle adults 79.84% (SE 1.90); and late adults 72.88% (SE 2.33).

Here will focus on selected case scenarios: comparing a foreseeable combination of noiseless pavements with hybrid cars to traditional pavements with conventional passenger cars. In the first case, the impairment of vehicle detection is quit clear (Figure 3). The overall mean detection in the sample is of 69.60 (SE 1.64) for the hybrid / open asphalt rubber condition with only the age group of 20-39 years old being able to reach a suprathreshold of 79.48 (SE 2.36). Older participants reached the lowest mean detection percentage of 58.41 (SE 3.17) in that condition and they were still below threshold for the ordinary vehicles – dense asphalt scenario with a percentage of only 70.76 (SE 2.55) of correct detections.

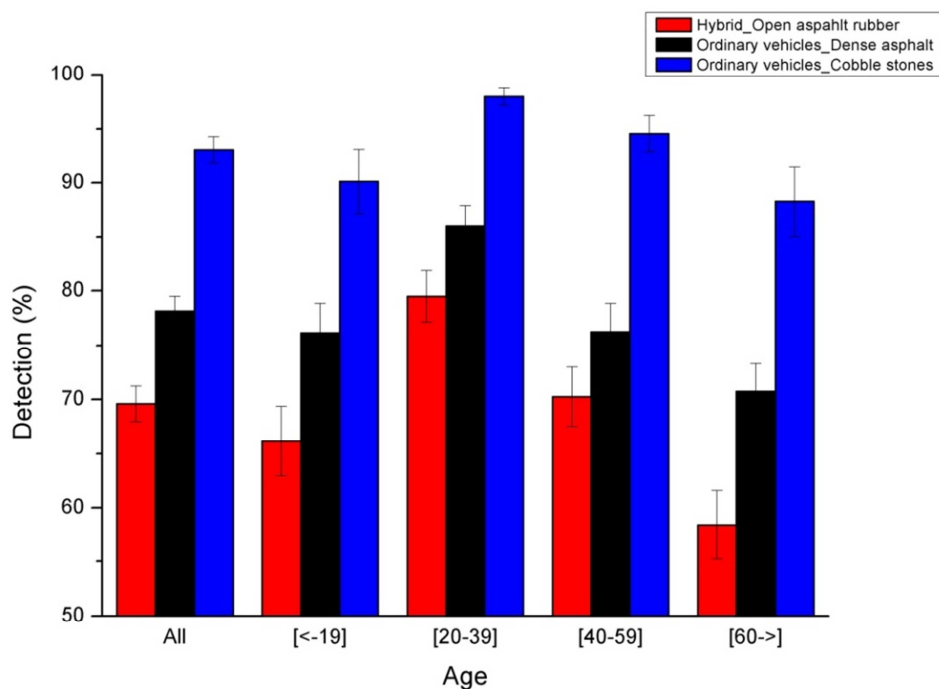


Fig. 3. Overall and age groups mean detection percentages and SE for selected scenarios.

The combination of pavement and vehicle types seems to have an interactive effect on detection performance, which is consistent across age groups. Considering the overall data from the sample, the detection decreases 4.95% and 21.15% from dense asphalt and cobble stones to the open asphalt rubber pavement, respectively. The mean decrease is of 2.67% from the internal combustion engine vehicles to the hybrid. In the extreme scenarios the detection of the approaching vehicle is decreased

respectively in 8.55 % and 23.5 %, from the conditions with ordinary vehicles - dense asphalt and cobble stones to the condition with hybrid - open asphalt rubber.

Older adults of 60 years old and above are the most impaired in these extreme scenarios with detection differences of 12.35% and 29.88%. These results point to a somehow additive effect where noisier sounds add up to noisier pavements and interact with the listeners' auditory accuracy.

CONCLUSION

Approaching our findings from a practical point of view, two key factors on noise abatement should be considered.

First, the relation between pavement type and traffic noise abatement should be taken cautiously. A substantial investment has been made in new asphalt rubber mixtures under the argument that they should reduce traffic noise. Although the noise reduction cannot be contested, it should be stressed that the perceived differences by users might not be as significant as expected.

Second, a cost-effective approach to reduce noise-related discomfort should also consider traffic management approaches as traffic calming, including the control of traffic speed and density, two factors that in this study revealed a consistent effect on annoyance ratings.

Considering traffic safety and the possibility of a trade-off, our results clearly point to a negative impact of traffic noise abatement on the detection of approaching vehicles.

The following concerns should be stressed.

1. Detection is significantly lowered by noiseless pavements and quieter vehicles.
2. Younger and particularly older participants are the most impaired.
3. Not only all variables revealed direct effects over the vehicle detectability, but moreover they all showed interactive effects. Therefore, comprehensive approaches that account for subject's age (or listening abilities), vehicle and pavement type, as well as background noise are needed.
4. In the real world the detection performance should be even worst. First, we used a standard white noise background, while in everyday situations road traffic contributes heavily to the noise environment, thus reducing the conspicuity of the sound envelope of each vehicle. Secondly, in our experiments participants had to detect only one approaching vehicle at a time instead of facing simultaneously several targets.
5. Moreover, transition periods as we are already living nowadays, are potentially very difficult and risky. Vulnerable road users will inevitably have to cope with a growing mix of vehicles and pavements, with varying degrees of conspicuity. In such a transition scenario, hybrid and full electric vehicles, circulating on noiseless pavements, might prove quite difficult to detect.
6. In short, with noise abatement a trade-off between a more pleasant and healthy urban road environment and an increase of traffic conflicts and accidents involving pedestrians and bicyclists should be a matter of concern.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was financed by the Portuguese Foundation for Science and Technology and FEDER, projects FCOMP-01-0124-FEDER-007560, FCOMP-01-0124-FEDER-022674 and PEst-OE/ECI/UI4047/2011.

REFERENCES

- Freitas, E., Mendonça, C., Santos, J.A., Murteira, C., & Ferreira, J.P. (2012). Traffic noise abatement: How different pavements, vehicle speeds and traffic densities affect annoyance levels, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 17, 321-326.
- Mendonça, C., Freitas, E., Santos, J.A., Ferreira, J.P. & Raimundo, I.D. (in preparation). Vehicle detection: a comprehensive analysis of pavement, vehicle type, velocity, age, environmental noise and psychoacoustic factors.