

MODELAÇÃO DA VELOCIDADE LIVRE DE CIRCULAÇÃO EM ESTRADAS PORTUGUESAS DE DUAS VIAS

António Lobo, António Couto e Carlos Rodrigues

Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

email: lobo@fe.up.pt <http://www.fe.up.pt>

Sumário

Este artigo apresenta um modelo de estimação da velocidade livre de circulação desenvolvido para estradas portuguesas de duas vias. O modelo adota uma formulação exponencial e é aplicável a retas e curvas, englobando não só as características do elemento em consideração, mas também do respetivo troço a montante e do campo de visão para jusante. Os resultados obtidos permitem verificar que a curvatura horizontal exerce uma influência primordial nas velocidades praticadas, não sendo contudo negligenciáveis os efeitos produzidos por fatores tais como a largura do perfil transversal, a densidade de interseções e a visibilidade para jusante.

Palavras-chave: velocidade livre de circulação; características geométricas; atrito lateral; modelação; estradas de duas vias.

1 INTRODUÇÃO

A velocidade é um dos fatores mais importantes para a avaliação do desempenho de uma infraestrutura rodoviária. A velocidade de projeto de uma determinada estrada é estabelecida com base na classificação funcional pretendida, constituindo o ponto de partida dos projetistas para a definição das características geométricas que permitam que a estrada corresponda às expectativas dos condutores em termos de velocidade e de tempo de viagem. Em fase de operação, a velocidade operacional é também um forte indicador do desempenho da estrada, sendo frequentemente estimada pelo percentil 85 da distribuição de velocidades (V85) recolhidas em ambiente real [1]. Assim, a velocidade é correntemente reconhecida por planeadores, projetistas e utilizadores de estradas como uma medida fundamental na avaliação do nível de serviço, na definição de limites legais de velocidade, na avaliação da consistência do traçado, na análise de segurança rodoviária, entre outros estudos.

No mesmo sentido, o *Highway Capacity Manual 2010* (HCM) [2] aponta a velocidade como o indicador mais apropriado para análise económica e ambiental de estradas de duas vias, incluindo a avaliação dos efeitos produzidos no ruído e na qualidade do ar. Também a metodologia do HCM para a avaliação do nível de serviço deste tipo de estradas recorre à velocidade média de circulação, que, por sua vez, está dependente da velocidade livre de circulação e do volume de tráfego. Por outras palavras, a velocidade média adiciona à velocidade livre de circulação os efeitos dos atrasos causados pelos demais utentes da estrada. Assim sendo, a velocidade livre de circulação traduz a resposta dos condutores face às características geométricas e ambientais da estrada quando não circulam constrangidos pela presença de outros veículos. A definição velocidade livre de circulação (*free-flow speed* ou FFS) preconizada pelo HCM é similar à definição de velocidade operacional (*operating speed*) contemplada na *AASHTO Green Book* [1]. Contudo, a velocidade pode também ser afetada pela perceção de risco dos condutores, pelos limites legais de velocidade e ações de fiscalização, pelas diferentes culturas de condução e pelo grau tecnológico dos veículos. Por estes motivos, numerosas propostas para modelação de velocidades têm sido apresentadas ao longo dos tempos e para diferentes regiões do globo.

Geralmente, os manuais de referência e as normas de traçado de estradas de diferentes países estabelecem a velocidade operacional para troços de estrada em detrimento de elementos específicos. O HCM [2] propõe uma FFS de base para estradas sem interseções e com larguras de vias e de bermas superiores a 3,6 m e a 1,8 m, respetivamente. Para estradas com características inferiores, é proposto um modelo de estimação da FFS com base

em reduções aplicadas à FFS de base, causadas por superiores densidades de interseções e por menores larguras do perfil transversal. O *AASHTO Green Book* [1] fornece algumas recomendações sobre as velocidades de projeto e operacional de acordo com a classificação funcional da estrada. O mesmo sucede com a Norma de Traçado portuguesa [3] relativamente às velocidades base e de tráfego. Noutros países, tais como a Alemanha [4] e o Reino Unido [5], as velocidades operacionais dependem da taxa de variação da curvatura e da largura pavimentada, no primeiro caso, e da sinuosidade e da velocidade média, no segundo caso.

Para além das entidades gestoras das infraestruturas rodoviárias, também muitos investigadores no mundo académico têm-se debruçado sobre a problemática da modelação das velocidades. Recorrendo geralmente a uma abordagem mais microscópica, estes autores têm explorado os efeitos na velocidade produzidos por um conjunto alargado de variáveis, resultando em propostas de modelos para diferentes elementos geométricos, tipos de veículos e condições ambientais. Estes estudos têm originado algumas metodologias rigorosas de avaliação da consistência do traçado de estradas [6-9].

A geometria da diretriz tem sido correntemente apontada como o fator mais condicionante da velocidade, podendo a curvatura ser caracterizada por diferentes indicadores, tais como o raio, o grau da curva, a taxa de variação da curvatura ou o ângulo de deflexão. Inclusivamente, existem alguns modelos que consideram estas características como as únicas que exercem efeitos relevantes na velocidade, como é o caso de Morrall e Talarico [10], Passetti e Fambro [11], Misaghi e Hassan [12] e Kanellaidis *et al.* [13].

Os efeitos da geometria da rasante na velocidade têm sido menos estudados, provavelmente devido à sua menor importância para a circulação dos veículos ligeiros. Contudo, é de destacar alguma pesquisa relevante sobre os efeitos simultâneos da diretriz e da rasante nas velocidades adotadas pelos condutores. Neste sentido, Fitzpatrick *et al.* [14] e Gibreel *et al.* [15] propuseram modelos de estimação da V85 para diferentes elementos geométricos da rasante. Por seu turno, Donnell *et al.* [16] procedeu à modelação da velocidade de veículos pesados em curvas horizontais, tendo em consideração as inclinações das retas imediatamente a montante e a jusante.

Os efeitos da largura do perfil transversal têm sido igualmente estudados por diversos autores com recurso a abordagens distintas: Lamm e Choueiri [7] consideraram as larguras de via e de berma num modelo de estimação de velocidades para estradas do estado de Nova Iorque, nos EUA; Lamm *et al.* [8] propuseram vários modelos de velocidades para diferentes categorias de largura de via; Melo *et al.* [17] conduziram um estudo no simulador de condução *DriS* da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, do qual resultaram reduções de velocidade produzidas por diferentes larguras de via e berma, permitindo uma análise comparativa com as propostas pelo HCM [2].

A influência das expectativas dos condutores sobre o traçado da estrada tem sido introduzida em modelos de estimação de velocidades em secções através de variáveis caracterizadoras dos troços a montante e a jusante. Neste sentido, a velocidade na reta de aproximação utilizada por Krammes *et al.* [6] e por Bonneson *et al.* [18], bem como o conceito de velocidade desejada no troço proposto por McLean [19] foram incluídos na modelação de velocidades em curvas, representando a experiência recente de condução. As características do troço a jusante consideradas na literatura estão principalmente relacionadas com o campo de visão dos condutores [5, 20].

Além dos fatores já referidos, outras variáveis têm sido consideradas pelos investigadores na modelação de velocidades, tais como a extensão de retas ou curvas [6, 21-23], a sobre-elevação [15, 18, 21] ou o limite legal de velocidade [8, 22].

Apesar dos numerosos modelos propostos pela comunidade científica, entidades públicas e gestores de infraestruturas rodoviárias, o modelo apresentado neste artigo revela duas características distintivas: (i) permite a estimação da FFS para uma dada reta ou curva, tendo em consideração não só as características do elemento, como também dos troços a montante e a jusante; (ii) recorre a uma regressão exponencial, em detrimento da mais comum forma linear. Estas duas características vão de encontro a algumas das lacunas no estado da arte da modelação de velocidades apontadas pelo *Transportation Research Board* [24], nomeadamente referentes à escassa existência de modelos para retas e às limitações do uso da regressão linear.

O modelo de estimação da FFS proposto é aplicável a retas e curvas contidas em estradas portuguesas de duas vias, podendo ser utilizado como ferramenta para a avaliação da consistência do traçado, em alternativa ao procedimento contido na Norma de Traçado [3].

2 DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo permite a estimação da FFS num dado elemento da diretriz (reta ou curva) através de uma função exponencial das características da estrada, conforme descrito pela Equação 1:

$$FFS = f(X_e, X_m, X_j) = \beta_0 \cdot \exp(\beta_1 X_e) \cdot \exp(\beta_2 X_m) \cdot \exp(\beta_3 X_j) \quad (1)$$

Em que:

- X_e : características do elemento;
- X_m : características do troço a montante;
- X_j : características do troço a jusante;
- $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$: coeficientes de regressão.

A interação entre os efeitos produzidos pelas características da estrada e a ordem de grandeza das velocidades praticadas consiste numa das principais vantagens da forma exponencial face à linear, segundo a qual as variáveis independentes produzem efeitos cumulativos na velocidade que são independentes do tipo de estrada. Então, a utilização da função exponencial é provavelmente mais adequada à modelação de velocidades em países europeus, onde as velocidades operacionais das estradas de duas vias variam significativamente entre diferentes estradas, resultando igualmente em variações dos efeitos produzidos pelas características da estrada.

Os três conjuntos de variáveis X_e , X_m e X_j representam as características geométricas e do atrito lateral da estrada com influência nas velocidades praticadas pelos condutores. X_e caracteriza a reta ou curva para a qual se pretende estimar a FFS e pode incluir fatores como o raio, a extensão, a inclinação longitudinal e as larguras de via e berma. X_m descreve as características do troço a montante, como sejam as densidades de interseções e de construção marginal. A extensão do troço a montante pode ter uma extensão variável, dependendo das condições locais. X_j representa as características a jusante do elemento com influência no comportamento dos condutores e contempla tipicamente a distância de visibilidade. Em suma, o modelo proposto na Equação 1 traduz a ideia de que o comportamento de um condutor, ao descrever uma reta ou curva, não depende apenas das características desse elemento, mas também da experiência recente de condução e daquilo que ele consegue visualizar para jusante da sua localização. Conforme foi referido previamente, este princípio foi também explorado por outros investigadores, embora adotando abordagens distintas.

3 APLICAÇÃO DO MODELO

3.1 Recolha de dados

Para desenvolver o modelo aplicável a estradas portuguesas, foram selecionados diversos troços pertencentes às estradas N 14, N 101, N105-2, N 206 e N 222. Os troços escolhidos totalizam 116 km de estrada e situam-se fora de áreas urbanas, sendo que a ocupação marginal varia desde a completa ausência de construção (Figura 1a) até à existência de edifícios isolados (Figura 1b). O limite legal de velocidade varia entre os 50 e os 90 km/h e o terreno é do tipo ondulado [2].



Fig.1. Exemplos de locais considerados: a) ausência de construção; b) presença de construção dispersa

A medição de velocidades em secção foi realizada em 27 retas e 61 curvas. Uma vez que o modelo engloba características da estrada a montante e a jusante, a velocidade teve que ser aferida separadamente para cada sentido de circulação, o que permitiu duplicar o número de observações para um total de 176. A recolha de dados decorreu em período diurno e na ausência de chuva ou nevoeiro. O pavimento encontrava-se em bom estado, com ausência de deficiências passíveis de causar reduções de velocidade. As velocidades dos veículos foram registadas com recurso a contadores de tráfego, compostos por um radar Doppler integrado com uma memória Flash RAM e um relógio em tempo real, montados aproximadamente na secção média das retas e das curvas em análise. A montagem dos dispositivos procurou torná-los o mais impercetíveis possível aos condutores, que tendem a reduzir a sua velocidade na presença de objetos não familiares instalados junto à estrada.

Assumiu-se o percentil 85 da distribuição de velocidades (V85) dos veículos que circulam em regime livre como sendo a FFS associada a uma determinada reta ou curva. O regime livre de circulação é estabelecido sempre que um veículo circula com um intervalo temporal de, no mínimo, 6 segundos relativamente ao veículo precedente, conforme proposto por Lobo *et al.* [25] num estudo desenvolvido em estradas portuguesas de duas vias. No conjunto dos 88 locais selecionados, foram aferidas as velocidades de mais de 90.000 veículos livres, garantindo sempre um mínimo de 100 registos por observação, conforme recomendado pelo HCM para a estimação da V85 [2]. A percentagem de veículos pesados estimada nas estradas avaliadas é de cerca de 10% do total de veículos.

As características geométricas e do atrito lateral da estrada foram levantadas com recurso ao veículo instrumentado do Laboratório de Análise de Tráfego da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, equipado com sistemas GPS e de videogravação do ambiente circundante. Além das velocidades, foram levantados os seguintes indicadores:

- Características da diretriz: variável *dummy* para curvas, raio da curva, extensão, inclinação longitudinal, largura pavimentada e desobstrução lateral adicional;
- Características do troço a montante: sinuosidade, densidade de interseções e densidade de construção marginal;
- Características do troço a jusante: variável *dummy* para visibilidade limitada.

Com vista à utilização do mesmo modelo matemático para estimação da FFS em retas e curvas, a variável *dummy* para curvas assume o valor 1 no caso de se tratar de tal elemento ou o valor 0 no caso de ser uma reta. O raio da curva é apenas utilizado para este tipo de elemento e é eliminado para retas através da multiplicação pela variável *dummy* anterior. Os valores considerados para a inclinação longitudinal e para as características do perfil transversal são representativos da totalidade do elemento em consideração. A largura pavimentada traduz a soma da largura de via e de berma e foi recolhida por sentido de circulação. A desobstrução lateral adicional diz respeito à distância entre o limite exterior da berma e qualquer objeto fixo à margem da estrada.

Nesta aplicação, considerou-se troços a montante com uma extensão fixa de 1 km. A sinuosidade é representada pelo somatório dos ângulos de deflexão por quilómetro. As densidades de interseções e de construção marginal

traduzem o número por quilómetro de interseções com outras estradas públicas e de edifícios construídos à margem da estrada, respetivamente. Devido à pouca fiabilidade dos dados altimétricos registados pelo GPS, optou-se por não considerar os efeitos produzidos pela rasante do troço a montante na FFS do elemento. No entanto, os autores consideram que estes deverão ser reduzidos face ao impacto da diretriz, cujas características condicionam as expectativas dos condutores sobre a qualidade do traçado e sobre os padrões de segurança da estrada.

Os efeitos causados pelo troço a jusante são incluídos nesta aplicação através de uma única variável *dummy* representativa do campo de visão do condutor quando circula no elemento em análise. A ideia subjacente diz respeito a que a secção a jusante apenas afeta a escolha de velocidade do condutor na medida das características geométricas que ele consegue visualizar no momento. A variável *dummy* assume o valor 1 se o condutor descreve uma curva de raio igual ou inferior ao raio mínimo absoluto ou se existe tal curva dentro da distância de visibilidade de decisão [3], ou assume o valor 0 no caso contrário.

As variáveis recolhidas no caso de estudo e incluídas no modelo estão descritas no Quadro 1.

Quadro 1. Descrição das variáveis

	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Frequência relativa (%)
Retas – 54 observações					
FFS (km/h)	73,7	9,4	59,0	94,0	—
<u>Caraterísticas do elemento</u>					
Extensão (m)	344,7	200,5	161,0	1054,9	—
Largura pavimentada (m)	4,9	1,4	3,1	9,6	—
Desobstrução lateral adicional (m)	0,3	0,5	0,0	1,7	—
<u>Caraterísticas do troço a montante</u>					
Sinuosidade (°/km)	182,9	140,0	8,9	593,5	—
Densidade de interseções (N.º/km)	3,5	2,1	0,0	9,0	—
<u>Caraterística do troço a jusante</u>					
<i>Dummy</i> para visibilidade limitada	—	—	—	—	20,4
Curvas – 122 observações					
FFS (km/h)	65,2	12,1	43,0	98,0	—
<u>Caraterísticas do elemento</u>					
Raio da curva (m)	181,4	156,6	35,0	680,0	—
Extensão (m)	116,4	71,8	40,3	387,3	—
Largura pavimentada (m)	5,5	1,6	3,4	16,3 ^a	—
Desobstrução lateral adicional (m)	0,4	0,6	0,0	3,0	—
<u>Caraterísticas do troço a montante</u>					
Sinuosidade (°/km)	239,7	172,4	13,8	854,7	—
Densidade de interseções (N.º/km)	3,4	2,0	0,0	10,0	—
<u>Caraterística do troço a jusante</u>					
<i>Dummy</i> para visibilidade limitada	—	—	—	—	52,5

^a Valor excecional correspondente a um local com uma área de estacionamento não delimitado na berma.

3.2 Modelação

Para desenvolver o modelo de estimação da FFS em estradas portuguesas de duas vias, adotou-se uma regressão exponencial múltipla, com recurso a uma forma linearizada da Equação 1. No Quadro 2, apresenta-se os coeficientes de regressão e os respetivos erros padrão. Com exceção das variáveis *dummy*, os coeficientes representam as elasticidades das características da estrada.

Quadro 2. Resultados da regressão exponencial múltipla

Variável	Coefficiente	Erro padrão
Constante	3,999	0,132 ^a
<u>Caraterísticas do elemento</u>		
Dummy para curvas	-0,626	0,093 ^a
Raio da curva	0,118	0,017 ^a
Extensão	0,065	0,019 ^a
Largura pavimentada	0,058	0,035 ^b
Desobstrução lateral adicional	0,009	0,004 ^a
<u>Caraterísticas do troço a montante</u>		
Sinuosidade	-0,019	0,011 ^b
Densidade de interseções	-0,036	0,014 ^a
<u>Caraterística do troço a jusante</u>		
Dummy para visibilidade limitada	-0,043	0,023 ^b
R = 0.81		
R ² ajustado = 0.63		

^a Variável estatisticamente significativa para o nível de 5%.

^b Variável estatisticamente significativa para o nível de 10%.

O coeficiente de correlação (R) superior a 0,50 atingido pelo modelo exponencial traduz elevadas correlações entre as variáveis dependente e independentes [26]. Como comparação, foi também aplicada à base de dados uma regressão linear, resultando numa inferior qualidade do ajuste.

Os resultados apresentados no Quadro 2 revelam que o facto de um condutor circular num elemento curvo é o fator mais importante para a sua escolha de velocidade, podendo ter um efeito negativo de 47% na FFS. Este comportamento corresponde às expetativas, uma vez que curvas com raios muito elevados não são comuns nas estradas portuguesas de duas vias. A diminuição em 10% do raio da curva produz uma redução de velocidade de 1,2%. A extensão do elemento possui uma elasticidade positiva (0,065), similar aos efeitos combinados das variáveis caraterizadoras do perfil transversal (0,067).

O aumento do atrito lateral e a diminuição da qualidade geométrica dos troços adjacentes causam reduções na FFS praticada numa determinada reta ou curva, que são, contudo, de menor magnitude face às caraterísticas do elemento. O aumento em 10% da sinuosidade e da densidade de interseções a montante produz uma diminuição da velocidade de 0,6%, enquanto a visibilidade limitada para jusante pode reduzir a FFS em cerca de 4%.

Por não se revelarem estatisticamente significativas ao nível de 10%, as variáveis inclinação longitudinal e densidade de construção marginal foram removidas do modelo. Nesta aplicação, a densidade de construção marginal revela problemas de multicolinearidade com a densidade de interseções, dado que o incremento do número de interseções está altamente correlacionado com o atravessamento de pequenas localidades. A falta de significância estatística da inclinação longitudinal pode estar relacionada com os valores relativamente baixos observados nos locais de recolha de velocidades, com valores absolutos raramente superiores a 5% e um valor médio de 3%. Por este motivo, os autores não recomendam a aplicação do modelo desenvolvido a estradas construídas em terreno montanhoso.

O modelo de estimação da FFS proposto para as estradas portuguesas de duas vias está presente na Equação 2.

$$FFS = \exp[3,999 - 0,626C + 0,118 \ln(R) \cdot C + 0,065 \ln(E) + 0,058 \ln(LP) + 0,009 \ln(DLA) - 0,019 \ln(S) - 0,036 \ln(DI) - 0,043VL] \quad (2)$$

Em que:

- FFS: velocidade de circulação em regime livre (km/h);
- C: dummy para curvas;
- R: raio da curva (m);

- E : extensão (m);
- LP : largura pavimentada (m);
- DLA : desobstrução lateral adicional (m);
- S : sinuosidade (°/km);
- DI : densidade de interseções (N.º/km);
- VL : *dummy* para visibilidade limitada;
- $DLA, S, DI > 0$.

4 COMPARAÇÃO COM MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA

Nesta secção, o modelo apresentado é comparado com outros modelos de velocidades desenvolvidos por diversos autores, bem como com a metodologia de estimação da FFS em estradas de duas vias proposta pelo HCM [2].

Conforme referido anteriormente, os efeitos da diretriz nas velocidades adotadas pelos condutores têm sido amplamente estudados, sendo aquela frequentemente apontada como o principal fator de influência. Então, dentro do conjunto de variáveis incluídas no modelo proposto, a influência do raio da curva na FFS apresenta-se como o mais fiável indicador para comparação com os modelos existentes na literatura.

Uma vez que estes modelos geralmente representam funções lineares do raio (R), da curvatura ($1/R$), do grau da curva (DC) ou de outras variáveis relacionadas, não são possíveis comparações diretas entre coeficientes e elasticidades. Por esse motivo, procedeu-se à estimação das elasticidades do raio para um conjunto de modelos selecionados: (i) os modelos foram aplicados ao caso de estudo para estimação da FFS para os valores médios da amostra; (ii) para cada modelo, a elasticidade do raio foi calculada através do impacto na FFS produzido por um aumento de 100% do seu valor médio, mantendo constantes as restantes variáveis. Os resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3. Avaliação da elasticidade do raio em modelos de velocidade existentes

Autor do modelo	Âmbito geográfico	Expressão matemática ^a	Elasticidade do raio
Morrall e Talarico [9]	Alberta, Canadá	$V_{85} = \exp(4,561 - 0,00586DC)$	0,094
Passetti e Fambro [10]	Nova Iorque, Pensilvânia, Oregão, Washington, Minesota e Texas, EUA	$V_{85} = 103,9 - 3020,5/R$	0,102
Misaghi e Hassan [11]	Ontário, Canadá	$V_{85} = 91,85 + 0,00981R$	0,022
Kanellaidis <i>et al.</i> [12]	Grécia	$V_{85} = 129,88 - 623,1/\sqrt{R}$	0,165

^a Em que: $V_{85} = FFS$ (km/h);

$DC = \text{grau da curva } (^\circ/100 \text{ m de arco}) = 5729,58/R$.

A elasticidade do raio de 0,118 obtida no modelo proposto para estradas portuguesas está alinhada com os resultados de outros modelos. As diferenças observadas são relativamente baixas e poderão estar relacionadas com as práticas de condução e condições específicas de cada região.

Numa outra perspetiva, o HCM [2] propõe o modelo de estimação da FFS presente na Equação 3, sempre que não sejam possíveis medições em ambiente real.

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A \quad (3)$$

Em que:

- $BFFS$: FFS de base (km/h);
- f_{LS} : parâmetro de ajustamento devido à largura de via e berma (km/h);
- f_A : parâmetro de ajustamento devido à densidade de pontos de interseções (km/h).

O modelo do HCM preconiza uma FFS de base, correspondente à velocidade adotada em troços de estrada com as seguintes características: (i) larguras de vias e bermas iguais ou superiores a 3,6 m e 1,8 m, respetivamente; (ii) inexistência de interseções. Os fatores de correção f_{LS} e f_A traduzem reduções de velocidade causadas por perfis transversais mais estreitos e por superiores densidades de interseções, respetivamente.

Ao contrário do modelo proposto neste artigo, aplicável a elementos específicos do traçado (retas ou curvas), a metodologia do HCM é usada para troços de estrada. Uma vez que o modelo de estimação da FFS desenvolvido também inclui os efeitos da largura do perfil transversal e da densidade de interseções, apenas foram considerados os locais levantados em reta para efeitos de comparação com o HCM. Caso contrário, os resultados seriam fortemente afetados pela curvatura horizontal. Assim, as reduções de velocidades para as mesmas características do perfil transversal consideradas no HCM foram determinadas através do modelo proposto, utilizando uma densidade de interseções nula e os valores médios da amostra das restantes variáveis. Do mesmo modo, estimaram-se as reduções de velocidades para as mesmas categorias de densidade de interseções incluídas no HCM, utilizando o perfil transversal de base (largura de via de 3,6 m combinada com uma largura de berma de 1,8 m) e os valores médios da amostra dos restantes indicadores. Os resultados são apresentados no Quadro 4 (f_{LS}) e no Quadro 5 (f_A).

Quadro 4. Redução da FFS devido à largura de via e de berma (km/h)

Largura de via (m)	HCM 2010				Largura de via (m)	Modelo proposto			
	Largura de berma (m)					Largura de berma (m)			
	≥0,0<0,6	≥0,6<1,2	≥1,2<1,8	≥1,8		0,0	0,6	1,2	1,8
2,7<3,0	10,3	7,7	5,6	3,5	2,7	3,1	2,2	1,5	0,8
≥3,0<3,3	8,5	5,9	3,8	1,7	3,0	2,6	1,8	1,1	0,5
≥3,3<3,6	7,5	4,9	2,8	0,7	3,3	2,2	1,5	0,8	0,3
≥3,6	6,8	4,2	2,1	0,0	3,6	1,8	1,1	0,5	0,0

Quadro 5. Redução da FFS devido à densidade de interseções (km/h)

N.º de interseções/km	HCM 2010	Modelo proposto
0	0,0	0,0
6	4,0	4,9
13	8,0	6,9
19	12,0	7,9
25	16,0	8,6

O modelo desenvolvido retorna valores para f_{LS} que são significativamente inferiores aos valores contidos no HCM. A explicação pode residir, em primeiro lugar, no facto do modelo proposto incorporar um leque mais alargado de fatores com influência na FFS, o que pode originar uma redução dos efeitos individuais de cada variável. Em segundo lugar, tendo sido utilizada uma função exponencial, os efeitos das características da estrada não são cumulativos, dependendo da ordem de grandeza das velocidades praticadas. Conforme referido anteriormente, em países europeus como Portugal, as velocidades de circulação em estradas de duas vias podem variar consideravelmente de uma estrada para outra, sendo globalmente inferiores às velocidades adotadas na maioria das suas congéneres norte-americanas. Logo, para as mesmas características de perfil transversal, as reduções de velocidade em estradas europeias deverão ser igualmente mais reduzidas.

Relativamente aos valores retornados pelo modelo para f_A , verifica-se serem semelhantes aos valores do HCM para as categorias mais baixas de densidade de interseções. Contudo, com a intensificação do número de interseções, as reduções de velocidade tendem a estabilizar, ao contrário do comportamento linear assumido pelo HCM.

5 CONCLUSÕES

Ao longo dos tempos, a velocidade tem constituído um foco de interesse primordial para os investigadores nas áreas de projeto e operação de infraestruturas rodoviárias, tendo sido desenvolvidos numerosos modelos de velocidade operacional aplicáveis a diversas regiões do globo. Este artigo apresenta o desenvolvimento de um novo modelo com base no estudo das relações entre velocidade e características da geometria e do atrito lateral das estradas portuguesas de duas vias.

O novo modelo possui dois atributos pouco usuais no conjunto dos modelos desenvolvidos até ao momento: (i) considera a influência na FFS produzida pela geometria dos troços localizados a montante e a jusante do elemento em análise; (ii) faz uso de uma função exponencial, assumindo que os efeitos dos diversos fatores considerados dependem da ordem de grandeza das velocidades praticadas no local. Além disso, o modelo é aplicável a retas e a curvas, podendo contribuir para um procedimento alternativo de avaliação da consistência do traçado em estradas portuguesas [3].

Os resultados da aplicação descrita neste artigo confirmaram a influência primordial da curvatura horizontal na FFS, seguida da extensão do elemento e da largura do perfil transversal. A sinuosidade, o atrito lateral e a visibilidade para jusante revelaram também efeitos significativos na velocidade, sendo contudo inferiores aos causados pelas características do elemento.

A magnitude dos efeitos na FFS produzidos por algumas das variáveis incluídas no modelo revelou algumas diferenças relevantes comparativamente a outros modelos, nomeadamente face a estudos desenvolvidos em regiões com padrões distintos aos níveis do projeto rodoviário e da cultura de condução, como é o caso do HCM [2]. Neste sentido, os autores recomendam precaução na aplicação do modelo proposto fora do contexto português. No entanto, o desenvolvimento de modelos com uma estrutura similar aplicáveis a outras regiões do globo pode contribuir para a melhoria das capacidades de estimação das velocidades praticadas pelos condutores, potenciando uma gestão mais eficaz da rede rodoviária em condições de maior segurança e comodidade para todos os utentes.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento providenciado no âmbito do projeto SAFESPEED (PTDC/TRA/72998/2006).

REFERÊNCIAS

1. AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets – 6th Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2011.
2. TRB, *Highway Capacity Manual 2010*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010.
3. JAE, *Norma de Traçado*, Junta Autónoma de Estradas, Almada, 1994.
4. RAS-L, *Richtlinien fuer die Anlage von Strassen, Teil: Linienfuehrung*, Forschungsgesellschaft fuer Strassen-und Verkehrswesen, Colónia, 1995.
5. The Highways Agency, *Geometric Design is the Design Manual for Roads and Bridges, Vol. 6: Road Geometry, Section 1: Links*, Londres, 2002.
6. R. A. Krammes, Q. Brackett, M. A. Shafer, J. L. Ottesen, I. B. Anderson, K. L. Fink, K. M. Collins, O. J. Pendleton e C. J. Messer, *Horizontal Alignment Design Consistency for Rural Two-Lane Highways*, Publicação FHWA-RD-94-034, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 1995.
7. R. Lamm e E. M. Choueiri, Recommendations for Evaluating Horizontal Alignment Design Consistency Based on Investigations in the State of New York, *Transportation Research Record*, n.º 1122, pp. 68-78, 1987.

8. R. Lamm, E. M. Choueiri, J. C. Hayward e A. Paluri, Possible Design Procedure to Promote Design Consistency in Highway Geometric Design on Two-Lane Rural Roads, *Transportation Research Record*, n.º 1195, pp. 111-122, 1988.
9. G. M. Gibreel, S. M. Easa, Y. Hassan e I. A. El-Dimeery, State of the Art of Highway Geometric Design Consistency, *Journal of Transportation Engineering*, n.º 125, pp. 305-313, 1999.
10. J. Morrall e R. J. Talarico, Side Friction Demanded and Margins of Safety on Horizontal Curves, *Transportation Research Record*, n.º 1435, pp. 145-152, 1994.
11. K. A. Pasetti e D. B. Fambro, Operating Speeds on Curves with and Without Spiral Transitions, *Transportation Research Record*, n.º 1658, pp. 9-16, 1999.
12. P. Misaghi e Y. Hassan, Modeling Operating Speed and Speed Differential on Two-Lane Rural Roads, *Journal of Transportation Engineering*, n.º 131, pp. 408-417, 2005.
13. G. Kanellaidis, J. Golias e S. Efstathiadis, Driver's Speed Behavior on Rural Road Curves, *Traffic Engineering and Control*, n.º 31, pp. 414-415, 1990.
14. K. Fitzpatrick, L. Elefteriadou, D. W. Harwood, J. M. Collins, J. McFadden, I. B. Anderson, R. A. Krammes, N. Irizarry, K. D. Parma, K. M. Bauer e K. Pasetti, *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*, Publicação FHWA-RD-99-171, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 2000.
15. G. M. Gibreel, S. M. Easa e I. A. El-Dimeery, Prediction of Operating Speed on Three-Dimensional Highway Alignments, *Journal of Transportation Engineering*, n.º 127, pp. 21-30, 2001.
16. E. T. Donnell, Y. Ni, M. Adolini e L. Elefteriadou, Speed Prediction Models for Trucks on Two-Lane Rural Highways, *Transportation Research Record*, n.º 1751, pp. 44-55, 2001.
17. P. Melo, A. Lobo, A. Couto e C. M. Rodrigues, Road Cross-Section Width and Free-Flow Speed in Two-Lane Rural Highways, *Transportation Research Record*, 2012, *in press*.
18. J. Bonneson, M. Pratt, J. Miles e P. Carlson, *Development of Guidelines for Establishing Effective Curve Advisory Speeds*, Texas Transportation Institute Research Report 05439-1, Texas A&M University, College Station, 2007.
19. J. McLean, Driver Speed Behaviour and Rural Road Alignment Design, *Traffic Engineering and Control*, n.º 22, pp. 208-211, 1981.
20. P. J. Andueza, Mathematical Models of Vehicular Speed on Mountain Roads, *Transportation Research Record*, n.º 1701, pp. 104-110, 2000.
21. A. P. Voigt e R. A. Krammes, *An Operational and Safety Evaluation of Alternative Horizontal Curve Design Approaches on Rural Two-Lane Highways*, Texas Transportation Institute Research Report 04690-3, Texas A&M University, College Station, 1996.
22. K. S. Schurr, P. T. McCoy, G. Pesti e R. Huff, Relationship of Design, Operating, and Posted Speeds on Horizontal Curves of Rural Two-Lane Highways in Nebraska, *Transportation Research Record*, n.º 1796, pp. 60-71, 2002.
23. J. Cardoso, A. L. Macedo, G. Kanellaidis, A. Flouda, I. Dimitropoulos, H. Peltola, S. Ranta e G. Dupré, *Improvement of Models on the Relations between Speed and Road Characteristics*, SAFESTAR Task 5.3 Report, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1998.
24. TRB, *Modeling Operating Speed – Synthesis Report*, Transportation Research Circular No. E-C151, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
25. A. Lobo, M. A. P. Jacques, C. M. Rodrigues e A. Couto, Free Gap Evaluation for Two-Lane Rural Highways, *Transportation Research Record*, n.º 2223, pp. 9-17, 2011.
26. J. Cohen, *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences – Second Edition*, Lawrence Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, 1988.