

# NOVA METODOLOGIA PARA ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE OPERACIONAL EM ELEMENTOS GEOMÉTRICOS DE ESTRADAS DE DUAS VIAS

António Lobo<sup>1</sup>, António Couto<sup>1</sup> e Carlos Rodrigues<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal

email: [lobo@fe.up.pt](mailto:lobo@fe.up.pt)      <http://www.fe.up.pt>

---

## Sumário

*Este artigo apresenta um modelo de estimação da velocidade operacional aplicável a retas e curvas de estradas de duas vias. O modelo adota uma formulação de fronteira estocástica, oriunda da Econometria, permitindo estimar uma expressão matemática correspondente à fronteira de velocidades máximas operacionais, representativas dos condutores mais velozes, em função das características geométricas. Adicionalmente, o modelo permite estimar qualquer percentil de velocidades através da distribuição do erro assimétrico, representativa da variabilidade das características do condutor, veículo e ambiente. A comparação com outros modelos nacionais e internacionais comprova a sua capacidade de representação fidedigna da realidade na generalidade das situações testadas.*

---

**Palavras-chave:** velocidade operacional, modelos de fronteira estocástica, estradas de duas vias

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, os estudos sobre velocidade operacional têm ganho relevância em diversos países, à medida que diretrizes e normas de projeto de estradas começaram a considerar a velocidade de circulação expectável como um parâmetro relevante na definição dos elementos geométricos. Neste sentido, a comunidade científica e as entidades gestoras e operadoras do sistema rodoviário têm desenvolvido numerosos estudos sobre a estimação da velocidade operacional e a avaliação dos impactos produzidos por diversos fatores, tais como características geométricas e classificação funcional da estrada, atrito lateral, tráfego, limite legal de velocidade e condições meteorológicas. Destes estudos tem resultado um leque alargado de modelos de estimação da velocidade [1-2] e de procedimentos de avaliação da consistência do traçado [3-4].

Segundo o *Green Book* da *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) [5], o percentil 85 da distribuição de velocidades ( $V_{85}$ ) é a medida mais utilizada na representação da velocidade operacional. Contudo, o *Transportation Research Board* (TRB) considera que uma das grandes lacunas na área da modelação de velocidades se traduz no facto de que a maioria dos estudos apenas fornecem modelos capazes da estimação de determinados percentis de velocidade [1]. Tarris *et al.* [6] defendem que a perda de informação pela agregação dos dados de velocidade em percentis reduz a variabilidade da amostra, levando a que os impactos dos fatores geométricos estimados por regressão possam ser enviesados. Como forma de lidar com este problema, Tarris *et al.* propõem a modelação da distribuição completa de velocidades praticadas em regime livre de circulação. Neste sentido, Figueroa Medina e Tarko [7] desenvolveram modelos para diversos percentis de velocidade, representando cada percentil como uma combinação linear da média e do desvio padrão da distribuição de velocidades; os modelos distinguem as variáveis que afetam predominantemente a média das velocidades das que afetam a respetiva dispersão. Noutro estudo, Figueroa Medina e Tarko [8] introduzem efeitos aleatórios específicos do percentil e da localização na formulação dos modelos, como forma de evitar o enviesamento dos parâmetros causado por fatores não considerados.

Em Lobo *et al.* [9], foi apresentado um modelo exponencial de estimação de V85 em retas e curvas de estradas portuguesas de duas vias, i.e., de faixa de rodagem única contendo uma via para cada sentido de circulação. Esse modelo vai de encontro a algumas das lacunas apontadas pelo TRB [1], nomeadamente no que respeita à independência dos impactos produzidos pelas diferentes variáveis subjacente aos modelos de regressão linear, bem como à existência de poucos modelos aplicáveis a retas. O presente trabalho tem como principal objetivo a apresentação de um novo modelo de velocidade operacional que seja capaz de estimar qualquer percentil em retas e curvas de estradas de duas vias, o que se traduz num relevante contributo face aos modelos existentes no plano nacional e internacional. Nasce assim o Modelo de Fronteira da Velocidade Operacional (MFVO), desenvolvido com base nos modelos de fronteira estocástica oriundos do campo da Econometria [10-11].

O MFVO possui duas características distintivas fundamentais. Em primeiro lugar, introduz o conceito de velocidade máxima operacional, que traduz a velocidade estimada para o condutor mais veloz num determinado local, sob condições meteorológicas favoráveis e com o pavimento em bom estado, e é representado por uma fronteira de velocidades constituída por uma função exponencial das características geométricas locais (raio, extensão do elemento, inclinação longitudinal e largura da secção transversal). Em segundo lugar, os desvios dessa fronteira traduzem a variabilidade de velocidades atribuída aos fatores não geométricos, tais como as características dos condutores, dos veículos e do ambiente envolvente à estrada, o que permite a estimação de qualquer percentil de velocidades desejado pelo utilizador através da função cumulativa da distribuição do erro assimétrico.

## 2 DESCRIÇÃO DO MODELO

A distribuição de velocidades observada num determinado local de uma estrada reflete a variabilidade das velocidades praticadas causadas por diferentes interações entre os condutores, os veículos e a estrada. As características permanentes da estrada, relacionadas primordialmente com a sua geometria, constituem o fator comum a todos os condutores que nela circulam. Então, é possível afirmar que a velocidade mais elevada associada ao local é a menos influenciada pelas características passíveis restringir a velocidade associadas ao condutor, veículo e ambiente rodoviário, i.e., depende quase puramente das características geométricas da estrada.

A abordagem seguida no presente estudo segue um processo de modelação de fronteira estocástica, usualmente associada à análise econométrica, com vista à estimação de uma fronteira superior de velocidades operacionais, utilizando toda a distribuição dos veículos observados nos locais selecionados para calibração do modelo. A fronteira de velocidades é estabelecida em função das condições permanentes da estrada, que são amplamente aceites pela comunidade científica como sendo as principais variáveis com impacto na velocidade, mas também as que são mais objetivamente e facilmente quantificáveis, em comparação com às características dos condutores, veículos e ambiente envolvente. Os valores assumidos pela fronteira correspondem à velocidade estimada para o condutor mais veloz, em regime livre de circulação, para cada combinação de fatores geométricos, em condições de bom tempo e bom estado de conservação do pavimento, traduzindo, por isso, uma fronteira superior das velocidades operacionais. Isto leva a que seja designada por velocidade máxima operacional ( $V_{max}$ ). Note-se que  $V_{max}$  é um novo conceito que advém do tratamento estatístico de velocidades operacionais, logo não deve ser confundida com velocidades máximas associadas a situações limite da dinâmica dos veículos, tais como derrapagem ou capotagem.  $V_{max}$  mantém-se constante para todos os veículos que percorrem um determinado elemento curvo ou reto, sendo representada pela Equação 1.

$$V_{max_j} = \exp \left( \beta_0 + \sum_{k=1}^{n_k} \beta_k \ln X_{jk} \right) \quad (1)$$

Em que:

- $V_{max_j}$ : velocidade máxima operacional no elemento de estrada  $j$ ;
- $X_{jk}$ : característica geométrica  $k$  do elemento  $j$ ;
- $\beta$ : coeficientes de regressão.

A formulação exponencial traduz o princípio assumido de que os impactos produzidos por fatores geométricos não são cumulativos, mas antes dependentes da ordem de grandeza das velocidades praticadas. A principal vantagem do MFVO reside na sua capacidade de proporcionar a estimação de qualquer percentil de velocidades a partir de  $V_{max}$ , com base no erro assimétrico do modelo. Para além da componente normalmente distribuída do

erro, assumida na generalidade dos modelos de regressão, que confere a natureza estocástica a  $V_{max}$  e representa erros aleatórios relacionados com os dados e a especificação do modelo, o MFVO considera uma segunda componente de erro, assimetricamente distribuída, que permite a estimação da velocidade dos condutores situados abaixo da fronteira de velocidades  $V_{max}$  para cada combinação de fatores geométricos. O erro assimétrico é suscetível de ser associado a fatores não quantificados relacionados com os condutores, veículos e ambiente rodoviário. Subsequentemente, a função cumulativa da distribuição deste erro permite a estimação de qualquer percentil de velocidades desejado. A distribuição do erro assimétrico pode assumir diversas formas [10, 12]. Neste estudo, assume-se a forma exponencial devido à sua mais fácil utilização numa aplicação prática do modelo quando comparada, por exemplo, com a distribuição meia-normal [13], que foi testada sem que daí resultassem alterações significativas nos resultados. Para a distribuição  $f(u) = \theta \cdot \exp(-\theta u)$ , onde  $\theta$  é o parâmetro da função exponencial, a função cumulativa é dada por  $F(u) = 1 - \exp(-\theta u)$ , o que origina  $u = (-1/\theta) \cdot \ln(1 - F)$ . Então, o percentil  $p$  da distribuição de velocidades num determinado local pode ser estimado através da Equação 2.

$$Vp_j = Vmax_j \times \exp\left(\frac{1}{\theta} \ln p\right) \quad (2)$$

Em que:

- $Vp_j$ : percentil  $p$  da distribuição de velocidades no elemento de estrada  $j$ ;
- $p$ : valor do percentil ( $0 < p < 1$ ).

O MFVO é estimado pelo método da máxima verosimilhança, que se revela mais eficiente no processamento de erros assimétricos do que o método dos mínimos quadrados [13].

### 3 APLICAÇÃO DO MODELO

#### 3.1 Recolha de dados

Para estimar o MFVO, foram recolhidas velocidades e características geométricas correspondentes a 61 curvas e 27 retas localizadas nas seguintes estradas portuguesas de duas vias: N 14, N 101, N105-2, N 206 e N 222. Os elementos selecionados localizam-se fora de zonas urbanas, sendo que a ocupação marginal varia entre a completa ausência de construção e a presença de algumas edificações isoladas. As marcas rodoviárias e o pavimento encontravam-se em bom estado de conservação, não apresentando deficiências passíveis de induzir reduções na velocidade. A recolha de velocidades foi efetuada com o pavimento seco, durante o dia, recorrendo a contadores automáticos de tráfego equipados com um radar Doppler, colocados aproximadamente no ponto médio das curvas ou retas. Dado que o modelo considera variáveis representativas do perfil longitudinal, em cada local foram efetuadas medições de velocidades separadas por sentido de circulação. Para assegurar uma idêntica representatividade dos locais, foram incluídas na base de dados 102 observações por local e sentido, correspondentes às velocidades dos veículos observados em regime livre de circulação. Seguiu-se assim a recomendação do HCM [14], segundo a qual se deve considerar, em estudos de velocidade operacional, um mínimo de 100 velocidades medidas por local. De acordo com Lobo *et al.* [15], num estudo realizado em estradas portuguesas de duas vias, o regime livre de circulação estabelece-se para intervalos temporais entre veículos iguais ou superiores a 6 s. No total, a base de dados utilizada é composta por 17952 observações.

Recorreu-se ao veículo instrumentado do Laboratório de Análise de Tráfego da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para efetuar o levantamento das coordenadas GPS ao longo das estradas. O traçado foi posteriormente reconstituído através do ajuste de elementos geométricos aos pontos recolhidos num *software* de CAD. As variáveis geométricas incluídas no MFVO são as seguintes: variável binária para curvas ( $C$ ), raio ( $R$ ), extensão ( $E$ ), largura pavimentada ( $LP$ ), variável binária para inclinações longitudinais médias a severas ascendentes ( $IA$ ) e variável binária para inclinações longitudinais médias a severas descendentes ( $ID$ ). De acordo com a formulação do modelo, todas as variáveis contínuas são utilizadas na forma logarítmica.

A variável  $C$  permite o uso da mesma expressão matemática para retas e curvas:  $C = 1$  em curvas;  $C = 0$  em retas. A variável  $R$  é apenas utilizada no caso de elementos curvos, sendo anulada em retas através da multiplicação por  $C$ :  $C \times \ln R$ . Assumindo que  $E$  se traduz em diferentes impactos em retas e em curvas, esta variável é considerada separadamente para cada tipo de elemento. No caso das curvas, considera-se que os

impactos de  $E$  são dependentes do valor do raio. Então, inclui-se no modelo os respetivos efeitos cruzados, que são também anulados em retas pela multiplicação por  $C$ :  $C \times \ln R \times \ln E$ . Paralelamente, a variável binária para retas ( $T = 1$  para retas;  $T = 0$  para curvas) é criada com o único propósito de anular os efeitos de  $E$  em retas para elementos curvos:  $T \times \ln E$ .

Relativamente às características do perfil longitudinal, verificou-se que a introdução de uma variável contínua representativa da inclinação longitudinal ( $I$ ) não produziu resultados estatisticamente significantes ao nível da modelação. Este facto deve-se, provavelmente, à reduzida variabilidade desta variável, o que acaba por refletir a natureza predominantemente nivelada a ondulada do terreno nos locais escolhidos. Fitzpatrick *et al.* [2] obtiveram resultados similares, mas partindo do princípio de que a inclinação longitudinal tem impactos significativos na velocidade, desenvolveram modelos para diversas categorias de inclinação e encontraram impactos relevantes para valores a partir de 4%. Então, para capturar os efeitos das rampas mais acentuadas, os valores das inclinações são agregados neste estudo em duas variáveis binárias,  $IA$  e  $ID$ , que assumem o valor 1 se  $I \geq 4\%$  e  $I \leq -4\%$ , respetivamente, e o valor 0 nas restantes situações. A variável  $LP$  refere-se apenas ao sentido de circulação, constituindo a soma da largura da via com a largura da berma direita. Foram considerados valores médios representativos de cada local na quantificação das características dos perfis longitudinal e transversal.

As variáveis utilizadas na modelação são descritas no Quadro 1.

Quadro 1. Descrição das variáveis

	Média	Desvio padrão	Mínimo	Máximo	Frequência relativa (%)
<b>Retas</b>					
Velocidade (km/h) <sup>a</sup>	62,4	14,5	11,0	130,0	—
E (m)	344,7	198,6	161,0	1054,9	—
LP (m)	4,9	1,3	3,1	9,6	—
IA	—	—	—	—	16,7
ID	—	—	—	—	16,7
<b>Curvas</b>					
Velocidade (km/h) <sup>a</sup>	56,6	14,2	10,0	151,0	—
R (m)	181,4	156,0	35,0	680,0	—
E (m)	116,4	71,5	40,3	387,3	—
LP (m)	5,5	1,6	3,4	16,3 <sup>b</sup>	—
IA	—	—	—	—	20,5
ID	—	—	—	—	20,5

<sup>a</sup> Referente a veículos em regime livre de circulação.

<sup>b</sup> Valor excecional correspondente a um local com uma área de estacionamento não delimitado na berma.

### 3.2 Estimação do MFVO

Para estimar o MFVO para estradas portuguesas de duas vias, efetuou-se uma regressão baseada na Equação 2 entre as velocidades dos veículos em regime livre e as características geométricas dos locais selecionados. O modelo foi estimado com recurso ao *software* econométrico *Limdep* [13]. Os resultados são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2. Resultados da estimação do MFVO

Variável	Coefficiente	Erro padrão
Constante	3,930	0,036 <sup>a</sup>
C	-0,490	0,037 <sup>a</sup>
C × lnR	0,055	0,005 <sup>a</sup>
C × lnR × lnE	0,018	0,001 <sup>a</sup>
T × lnE	0,052	0,006 <sup>a</sup>
LP	0,033	0,006 <sup>a</sup>
IA	-0,022	0,004 <sup>a</sup>
ID	0,014	0,004 <sup>a</sup>
N.º de observações = 17952 Log-likelihood = 2000,435 $\sigma_u = 0,166$ $\sigma_v = 0,152^a$ $\theta = 6,019^a$		

<sup>a</sup> Estatisticamente significativo para o nível de 1%.

O coeficiente negativo de *C* revela que as velocidades são menores em curva do que em reta. As variáveis *R* e *E* produzem também impactos significativos na velocidade, pelo que se confirma que as características da diretriz constituem o fator com maior influência nas velocidades praticadas. Os resultados mostram ainda que percorrer uma rampa ascendente com inclinação igual ou superior a 4% provoca reduções de velocidade na ordem dos 2,2%, enquanto se tal rampa for descendente, a velocidade aumenta cerca de 1,4%.

Em termos de elasticidades, verifica-se que um aumento em 10% de *LP*, mantendo-se constantes as restantes variáveis, provoca um aumento de velocidade de 0,3%. Por sua vez, a duplicação de *E* em reta traduz-se num aumento de velocidade de 5,2%. Por via da consideração de efeitos cruzados entre *R* e *E* em curva, as respetivas elasticidades não são constantes. Então, os impactos dessas variáveis são quantificados em termos absolutos, através dos seguintes exemplos:

- Uma curva situada em terreno de nível, com *R* = 150 m e as restantes variáveis situadas na média da amostra (*E* = 116,4 m; *LP* = 5,5 m) resulta num valor estimado de *Vmax* de 67 km/h; a duplicação de *R* incrementa *Vmax* em 7 km/h;
- Uma curva situada em terreno de nível, com *E* = 150 m e as restantes variáveis situadas na média da amostra (*R* = 181,4 m; *LP* = 5,5 m) resulta num valor estimado de *Vmax* de 70 km/h; a duplicação de *E* incrementa *Vmax* em 5 km/h.

O MFVO proposto para a estimação da velocidade máxima operacional e de qualquer percentil da distribuição de velocidades em retas ou curvas de estradas portuguesas de duas vias é formulado pelas Equações 3 e 4.

$$V_{max} = \exp(3,930 - 0,490 \times C + 0,055 \times C \times \ln R + 0,018 \times C \times \ln R \times \ln E + 0,052 \times T \times \ln E + 0,033 \times \ln LP - 0,022 \times IA + 0,014 \times ID) \quad (3)$$

$$V_p = V_{max} \times \exp\left(\frac{1}{6,019} \times \ln p\right) \quad (4)$$

Em que:

- *C*: variável binária para curvas;
- *R*: raio (m);
- *E*: extensão (m);
- *T*: variável binária para retas;
- *LP*: largura pavimentada (m);
- *IA*: variável binária para inclinações longitudinais médias a severas ascendentes;
- *ID*: variável binária para inclinações longitudinais médias a severas descendentes;
- *Vp*: percentil *p* da distribuição de velocidades.

### 3.3 Estimação de percentis de velocidade

O MFVO proposto nas Equações 3 e 4 permite a estimação de qualquer percentil de velocidade a partir das características geométricas do local. Contudo, sempre que essas características não se encontrem disponíveis ou definidas, como, por exemplo, em fase de planeamento de uma estrada, o modelo pode, ainda assim, ser utilizado através da atribuição, na Equação 4, de um valor aproximado ou pretendido para  $V_{max}$ . A Figura 1 representa os percentis de velocidade estimados para diferentes valores de  $V_{max}$  nas condições observadas ( $\theta = 6,019$ ).

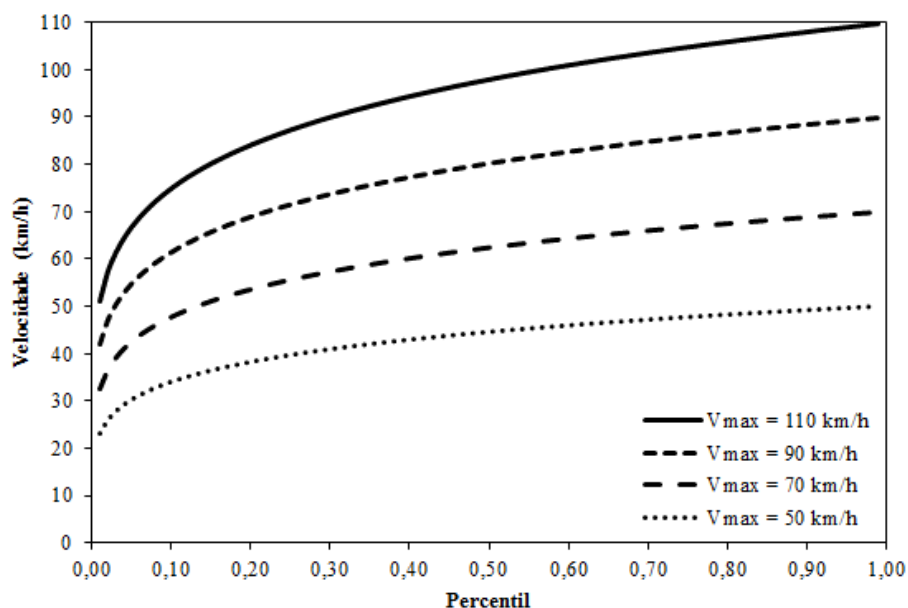


Fig.1. Estimação de percentis de velocidade para diferentes valores de  $V_{max}$

## 4 COMPARAÇÃO COM MODELOS EXISTENTES NA LITERATURA

O modelo proposto é validado através da comparação dos seus resultados com observações reais e com os resultados de outros modelos existentes no plano nacional e internacional. Deste modo, foram efetuadas recolhas de velocidades em três locais de validação, duas curvas e uma reta, selecionados fora da amostra original. As curvas distinguem-se significativamente através da sua geometria, possuindo a curva 1 um raio muito menor do que a curva 2. Os locais de validação são descritos no Quadro 3.

Quadro 3. Características genéricas dos locais de validação

Caraterísticas dos locais	Curva 1	Curva 2	Reta
R (m)	75,0	245,0	—
E (m)	136,9	387,3	512,6
LP (m)	4,7	5,9	5,8
I (%)	-4,0	5,0	-2,0

Dos numerosos modelos existente na literatura, selecionou-se para comparação com o MFVO o modelo de estimação de  $V_{85}$  anteriormente desenvolvido pelos autores, bem como modelos capazes de estimar diferentes percentis de velocidade. Contudo, como a generalidade destes modelos representam apenas determinados

percentis, apenas os mais comuns, V15, V50 e V85, foram estimados para os locais de validação. Devido às diferentes especificações dos modelos, foi necessário proceder à aferição de diversas variáveis adicionais nos locais de validação. No Quadro 4, apresenta-se os modelos selecionados para comparação.

Quadro 4. Modelos utilizados para comparação com o MFVO

Modelo (Local)	Equação <sup>a</sup>
Lobo <i>et al.</i> [9] (Portugal)	$V85 = \exp(3,999 - 0,626C + 0,118C, \ln R + 0,065 \ln L + 0,058 \ln PW + 0,009 \ln ELC - 0,019 \ln B - 0,036 \ln DI - 0,043 CV)$
Figueroa Medina e Tarko [7] (Indiana, EUA)	$Vp, curva = 47,664 + 3,44 \times 10^{-3} SD - 2,639 RES - 2,541 DC + 7,954 SE - 0,624 SE^2 + 4,158 Z_p + 0,236 Z_p, DC - 0,199 Z_p, SE$ $Vp, reta = 57,137 - 0,071 TR - 3,082 PSL_{50} - 0,131 GR - 1,034 RES + 2,38 \times 10^{-3} SD - 1,67 \times 10^{-6} SD^2 - 0,422 INT + 0,040 PAV + 0,394 GSW + 0,054 USW - 2,233 FC + 5,982 Z_p + 1,428 Z_p, PSL_{50} + 0,061 Z_p, GR + 0,292 Z_p, INT - 0,038 Z_p, PAV - 0,012 Z_p, CLR$
Schurr <i>et al.</i> [16] (Nebraska, EUA)	$V50, curva = 67,4 - 0,1126 \Delta + 0,02243 L + 0,276 PS$ $V50, reta = 51,7 + 0,508 PS$ $V85, curva = 103,3 - 0,1253 \Delta + 0,0238 L - 1,039 G_1$ $V85, reta = 70,2 + 0,434 PS - 0,001307 T_{ADT}$
Andueza [17] <sup>b</sup> (Venezuela)	$V50, curva \approx 87,78 - 2251/R - 739/R_a + 0,02 S$ $V50, reta \approx 87,65 - 2064/R_a + 17,353 \times 10^{-3} L_a$ $V85, curva = 98,25 - 2795/R - 894/R_a + 0,03 S + 9,308 \times 10^{-3} L_a$ $V85, reta = 100,69 - 3032/R_a + 27,819 \times 10^{-3} L_a$
Cardoso [18] (Portugal)	$V15, curva = 51,695 - 266,940/\sqrt{R} + 0,43559 V15, tangent - 0,011272 R + 0,020297 L$ $V15, reta = 22,893 - 0,01875 B - 0,08627 GR + 0,00599 L - 0,20053 decl1 + 6,6083 lfaixa1 + 1,3299 lberma1$ $V50, curva = 43,127 - 307,101/\sqrt{R} + 0,41113 Vp, tangent + 3,1835 lfaixa1$ $V50, reta = 24,741 - 0,03119 B + 0,00744 L - 0,21502 decl1 + 8,7646 lfaixa1 + 1,5345 lberma1$ $V85, curva = 61,849 - 435,322/\sqrt{R} + 0,35167 Vp, tangent + 3,0560 lfaixa1 + 7938,99/R^2 + 0,02207 L$ $V85, reta = 37,146 - 0,04550 B + 0,01009 L - 0,19080 decl1 + 9,0898 lfaixa1 + 1,8999 lberma1$
Koepfel [19] (Alemanha)	$V50 = 65,23 + 4,293 b - 0,0756 CCR + 0,0000364 CCR^2$ $V85 = 0,065 + 0,484 V50 + 1,869 \times 10^{-2} V50^2 - 1,349 \times 10^{-4} V50^3$

<sup>a</sup> Em que: *L*: extensão (m); *PW*: largura pavimentada (m); *ELC*: desobstrução lateral adicional (m); *B*: sinuosidade (°/km); *DI*: densidade de interseções (n.°/km); *CV*: variável binária para visibilidade limitada; *SD*: distância de visibilidade (ft); *RES*: variável binária para acessos a residências; *DC*: grau de curvatura (°/100 ft de arco); *SE*: sobrelevação (%); *Z<sub>p</sub>*: variável normal estandardizada correspondente ao percentil *p*; *TR*: percentagem de veículos pesados; *PSL<sub>50</sub>*: variável binária para limite legal de velocidade a 50 mi/h; *GR*: inclinação longitudinal (%); *INT*: variável binária para interseções; *PAV*: largura pavimentada total (ft); *GSW*: largura total de berma em gravilha (ft); *USW*: largura total de berma não tratada (ft); *CLR*: desobstrução lateral total (ft); *FC*: variável binária para curvas com raio superior a 1700 ft;  $\Delta$ : ângulo de deflexão (°); *PS*: limite legal de velocidade (km/h); *G<sub>1</sub>*: inclinação longitudinal da reta anterior (%); *T<sub>ADT</sub>*: tráfego médio diário (veículos/dia); *R<sub>a</sub>*: raio da curva anterior (m); *S*: distância de visibilidade (m); *L<sub>a</sub>*: extensão da reta anterior (m); *decl1*: declividade (m/km); *lfaixa1*: largura da faixa de rodagem (m); *lberma1*: largura total de berma (m); *b*: largura pavimentada total (m); *CCR*: variação da curvatura (gon/km).

<sup>b</sup> Andueza desenvolveu modelos de estimação da velocidade média que são considerados como modelos de V50 para efeitos de comparação com o MFVO.

A representação gráfica patente nas Figuras 2 a 4 permite a comparação entre os percentis de velocidade observados nos locais de validação e estimados através do MFVO e de outros modelos.

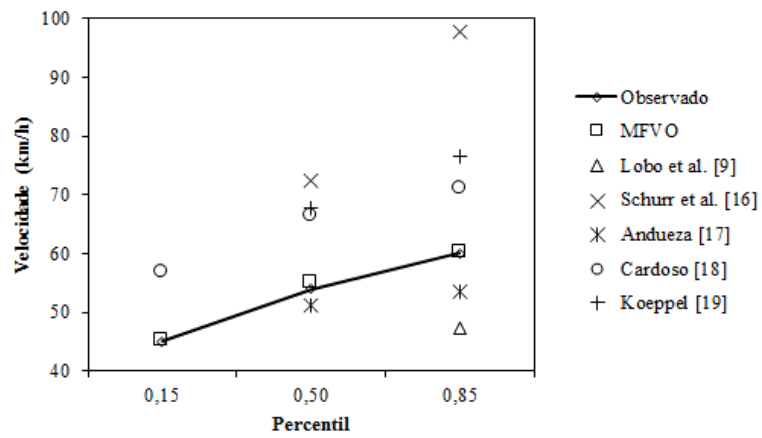


Fig.2. Comparação de resultados na curva 1 de validação

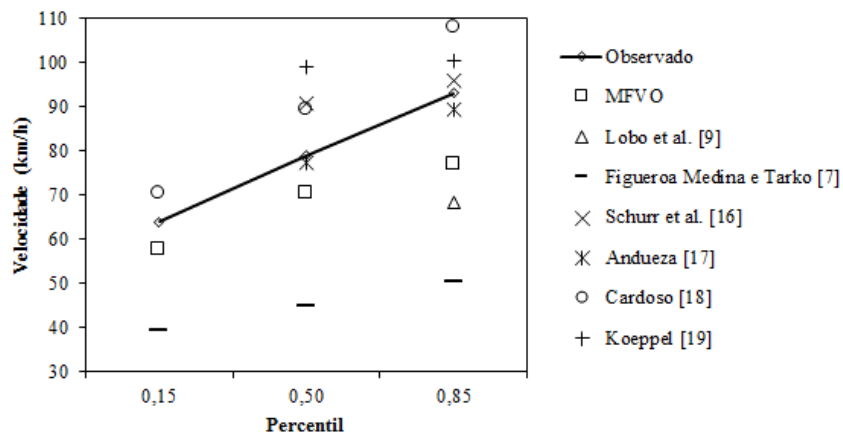


Fig.3. Comparação de resultados na curva 2 de validação

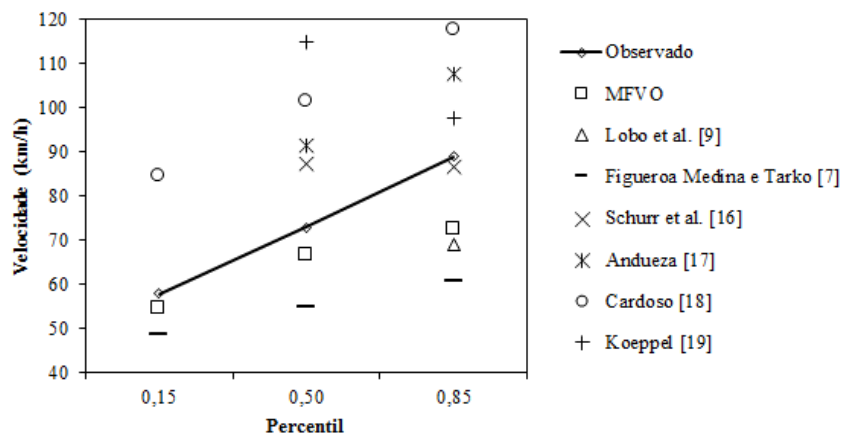


Fig.4. Comparação de resultados na reta de validação



A aplicação dos modelos aos locais de validação resulta em algumas inconsistências pelo facto de os modelos terem sido desenvolvidos em contextos distintos; algumas das variáveis aferidas naqueles locais podem estar fora dos limites de calibração dos modelos. O modelo de Figueroa Medina e Tarko [7] retornou resultados negativos na estimação de velocidades para a curva 1, tendo, por isso, sido excluído da comparação ilustrada na Fig. 2. A aplicação dos modelos de Schurr *et al.* [16] e Koepfel [19] à reta de validação origina valores de velocidade mais baixos para V85 do que para V50. Contudo, estes resultados são mostrados na Fig. 4, uma vez que representam boas aproximações aos valores observados, especialmente no caso de V85.

Relativamente ao comportamento do MFVO, os percentis de velocidade estimados situam-se dentro da gama de valores retornados pelos restantes modelos em todos os casos testados. O MFVO é o que fornece melhores resultados na curva 1, igualando os valores observados de V15 e V85 e superando V50 em apenas 1 km/h. É também o modelo que se aproxima mais aos valores observados de V15 e V50 na reta e V15 na curva 2, neste caso em igualdade com Cardoso [18], apresentando desvios de 6%, 9% e 10%, respetivamente. A melhor estimação de V50 na curva 2 é dada por Andueza [17], seguido pelo MFVO, com desvios de 2% e 11%, respetivamente, face ao valor observado. O MFVO apresenta os seus piores resultados na estimação de V85 na curva 2 e na reta, onde os desvios atingem 17% e 18%, respetivamente. Não obstante de outros modelos apresentarem desvios superiores, os melhores resultados naqueles casos são atingidos por Schurr *et al.* [16], com desvios de 3%.

O procedimento de validação efetuado demonstrou que o MFVO produz as melhores estimações de velocidade em 6 dos 9 casos testados. Os resultados sugerem que o MFVO se comporta especialmente bem em curvas apertadas, produzindo maiores desvios em curvas rápidas e retas face aos valores observados. O cariz algo sinuoso das estradas utilizadas para calibração do modelo pode estar na origem deste comportamento. Apesar disso, o MFVO, quando comparado com os modelos de Cardoso [18], também desenvolvidos em Portugal, produz menores desvios de velocidade face aos valores observados em 7 dos 9 casos testados, um desvio igual e um maior. Os resultados são ainda consistentes com os modelos desenvolvidos internacionalmente. Verifica-se então que o MFVO constitui uma ferramenta apropriada para estimar a velocidade operacional em estradas portuguesas de duas vias, para as quais foi calibrado. A sua estrutura demonstra potencialidades no campo da estimação de velocidades, podendo ser calibrado para as condições existentes noutros países.

## 5 CONCLUSÕES

A velocidade constitui um elemento fundamental na avaliação operacional, económica e ambiental das infraestruturas rodoviárias. Por este motivo, numerosos modelos de estimação da velocidade operacional têm sido desenvolvidos e aplicados nas mais diversas regiões do globo. Apesar disso, e tal como apontado pelo TRB [1], existem ainda algumas lacunas no campo da modelação de velocidades que importa colmatar. O desenvolvimento do MFVO aponta neste sentido, apresentando uma abordagem inovadora à modelação da velocidade operacional em secção através de um modelo de fronteira estocástica que é capaz de estimar qualquer percentil de velocidade pretendido pelo utilizador. O modelo estabelece uma fronteira de velocidades em função das características geométricas locais, estimando a velocidade máxima operacional para cada combinação de características geométricas. O erro assimétrico do modelo, atribuído à variabilidade na escolha da velocidade, reflete as condições não permanentes e não quantificadas presentes no ato da condução, globalmente relacionadas com as características dos condutores, dos veículos e do ambiente rodoviário. Logo, a função cumulativa da distribuição do erro assimétrico permite a estimação de qualquer percentil de velocidade. O MFVO retém ainda algumas das características distintivas do modelo de estimação de V85 anteriormente desenvolvido pelos autores [9], nomeadamente a interação entre as características geométricas e a ordem de grandeza das velocidades praticadas, permitida pela forma exponencial da fronteira de velocidades, bem como a aplicabilidade a retas e curvas, providenciando uma ferramenta que pode ser utilizada na avaliação da consistência do traçado rodoviário entre elementos geométricos consecutivos.

O MFVO foi calibrado e validado para o caso de estudo de estradas portuguesas de duas vias, tendo-se confirmado que os impactos na velocidade operacional produzidos pelas características da diretriz são predominantes face aos do perfil longitudinal e transversal. Recomenda-se que a aplicação do MFVO noutros contextos seja cuidadosamente avaliada, especialmente em países fora da Europa, onde as condições ao nível do projeto e ambiente rodoviário e da cultura de condução podem ser marcadamente diferentes. Contudo, devido à

sua estrutura e às variáveis consideradas, o MFVO é suficientemente versátil para que possa ser calibrado noutras regiões do globo, constituindo um importante contributo para a melhoria das capacidades de estimação da velocidade operacional em estradas de duas vias.

## AGRADECIMENTO

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento providenciado no âmbito da bolsa de doutoramento concedida ao primeiro autor (SFRH/BD/71322/2010).

## REFERÊNCIAS

1. TRB, *Modeling Operating Speed – Synthesis Report*, Transportation Research Circular No. E-C151, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2011.
2. 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. Passetti, *Speed Prediction for Two-Lane Rural Highways*, Publicação FHWA-RD-99-171, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 2000.
3. K. Fitzpatrick, M. D. Wooldridge, O. Tsimhoni, J. M. Collins, P. Green, K. M. Bauer, K. D. Parma, R. Koppa, D. W. Harwood, I. Anderson, R. A. Krammes e B. Poggioli, *Alternative Design Consistency Rating Methods for Two-Lane Rural Highways*, Publicação FHWA-RD-99-172, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Washington, D.C., 2000.
4. 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.
5. AASHTO, *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets – 6th Edition*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 2011.
6. J. P. Tarris, C. M. Poe, J. M. Mason, Jr. e K. G. Goulias, Predicting Operating Speeds on Low-Speed Urban Streets: Regression and Panel Analysis Approaches, *Transportation Research Record*, n.º 1523, pp. 46-54, 1996.
7. A. M. Figueroa Medina e A. P. Tarko, Speed Factors on Two-Lane Rural Highways in Free-Flow Conditions, *Transportation Research Record*, n.º 1912, pp. 39-46, 2005.
8. A. M. Figueroa Medina e A. P. Tarko, *Reconciling Speed Limits with Design Speeds*, Publicação FHWA-IN-JTRP-2004/26, Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2004.
9. A. Lobo, C. Rodrigues e A. Couto, Free-Flow Speed Model Based on Portuguese Roadway Design Features for Two-Lane Highways, *Transportation Research Record*, n.º 2348, pp. 12-18, 2013.
10. D. Aigner, C. A. K. Lovell e P. Schmidt, Formulation and estimation of stochastic frontier production functions, *Journal of Econometrics*, n.º 6, pp. 21-37, 1977.
11. W. Meeusen e J. van den Broeck, Efficiency Estimation from Cobb-Douglas Production Function with Composed Error, *International Economic Review*, n.º 18, pp. 435-444, 1977.
12. W. H. Greene, *Limdep Version 9.0 – Econometric Modeling Guide*, Econometric Software, Inc., Plainview, Nova Iorque, 2007.
13. W. H. Greene, *Econometric Analysis – Sixth Edition*, Pearson International Edition, Upper Saddle River, Nova Jérсия, 2008.
14. TRB, *Highway Capacity Manual 2010*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010.
15. 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.

16. 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.
17. P. J. Andueza, Mathematical Models of Vehicular Speed on Mountain Roads, *Transportation Research Record*, n.º 1701, pp. 104-110, 2000.
18. J. P. L. Cardoso, *Estudo das relações entre as características da estrada, a velocidade e os acidentes rodoviários. Aplicação a estradas de duas vias e dois sentidos*, Dissertação de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1996.
19. G. Koepfel, *Entwicklung einer Bemessung von Kurvenradius, Querneigung und Haltesichtweite in Abhängigkeit von der Fahrbaugometrie*, Relatório n.º 429, Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Bona, 1984.