

# EFEITOS DO PERFIL TRANSVERSAL NA VELOCIDADE EM REGIME LIVRE EM ESTRADAS DE DUAS VIAS

António Lobo

Pedro Melo

António Couto

Carlos Rodrigues

Faculdade de Engenharia  
Universidade do Porto, Portugal

## RESUMO

A escolha da velocidade é fortemente condicionada pelas características geométricas da estrada. Neste trabalho, estudou-se a influência das larguras de via e berma na velocidade em regime livre, em estradas de duas vias, tendo-se recorrido ao simulador de condução DriS da FEUP. Esta ferramenta permitiu a análise do comportamento de um grupo de condutores face à variação do perfil transversal. Deste modo, foi possível identificar as larguras de via e berma a partir das quais a velocidade em regime livre deixa de ser condicionada. Foram igualmente obtidas as reduções de velocidade associadas a larguras inferiores, tendo-se concluído que estas são função do tipo de estrada. Ao contrário do que é sugerido pelo *Highway Capacity Manual 2010*, os efeitos observados da variação de largura de via e de berma não são aditivos, uma vez que a sua conjugação resulta em efeitos de magnitude superior à soma dos efeitos individualizados.

## ABSTRACT

Speed choice is strongly determined by geometric road features. In this work, the influence of lane and shoulder widths on free-flow speed was studied using the driving simulator DriS installed at FEUP. The behavior of a set of drivers in face of different cross-section widths is analyzed for the two types of roads reproduced on the simulator. The lane and shoulder widths from which the free-flow speed was no longer conditioned by the dimensions of the road's cross-section were obtained, as well as the reduction in speed associated with smaller widths. The observed reduction in speed depends on the road's base speed. Contrary to what is suggested by the *Highway Capacity Manual 2010*, the individual effects of variations in lane and shoulder widths were not cumulative; greater impacts on free-flow speed were obtained by means of their simultaneous variation.

## 1. INTRODUÇÃO

A velocidade em regime livre, ou, em inglês, *free-flow speed* (FFS) é uma variável importante na caracterização do nível de serviço proporcionado por uma estrada. Representa a escolha de velocidade de um condutor que circula de forma não constrangida pelo veículo que o precede. Então, a FFS reflete, sobretudo, a resposta do condutor às características geométricas da estrada e ao ambiente envolvente, embora possa ser também influenciada pelo tipo de veículo e pelas práticas gerais de condução.

Segundo o *Highway Capacity Manual 2010* (HCM) (TRB, 2010), o nível de serviço para estradas de duas vias depende da velocidade média de percurso, que, por sua vez, é função da FFS. Sempre que não seja possível proceder à medição da FFS, o HCM (TRB, 2010) propõe um modelo de estimação (Equação 1), no qual são aplicadas correções a uma velocidade em regime livre de base (BFFS), que refletem as características geométricas da estrada.

$$FFS = BFFS - f_{LS} - f_A \quad (1)$$

em que  $FFS$ : velocidade em regime livre [km/h];  
 $BFFS$ : velocidade em regime livre de base [km/h];  
 $f_{LS}$ : ajustamento da FFS em função da largura da via e da berma [km/h];  
 $f_A$ : ajustamento da FFS em função da densidade de pontos de acesso ao traçado [km/h].

A BFFS traduz a FFS associada a estradas com características geométricas de base definidas pelo HCM (TRB, 2010): ausência de pontos de acesso; largura de vias superior a 3,6 m; largura de bermas superior a 1,8 m. Para superiores densidades de pontos de acesso e perfis transversais mais reduzidos, são propostas as reduções à FFS presentes na Tabela 1.

**Tabela 1:** Ajustamento ( $f_{LS}$ ) devido à largura das vias e das bermas (TRB, 2010)

Largura da via [m]	Redução na FFS [km/h]			
	Largura da berma [m]			
	$\geq 0,0 < 0,6$	$\geq 0,6 < 1,2$	$\geq 1,2 < 1,8$	$\geq 1,8$
2,7 < 3,0	10,3	7,7	5,6	3,5
$\geq 3,0 < 3,3$	8,5	5,9	3,8	1,7
$\geq 3,3 < 3,6$	7,5	4,9	2,8	0,7
$\geq 3,6$	6,8	4,2	2,1	0,0

A Tabela 1 sugere que os efeitos na FFS da variação das larguras de via e berma são aditivos, ou seja, resultam da soma dos respetivos efeitos individuais.

Este artigo pretende contribuir para a avaliação desses efeitos através de um estudo desenvolvido em simulador. São determinadas as larguras mínimas de via e berma a partir das quais não se observam reduções da FFS e os resultados são comparados com as propostas do HCM (TRB, 2010) contidas na Tabela 1.

Além disso, este trabalho permite a identificação do perfil transversal adequado à velocidade de circulação pretendida para um dado troço de estrada. Muitos estudos sobre segurança rodoviária referem a velocidade excessiva como uma das principais causas de sinistralidade (Swov, 2008; Gross e Brustlinm, 2009). Logo, as características geométricas do traçado (directriz, rasante e perfil transversal) devem sugerir aos condutores uma escolha de velocidade adequada, de modo a garantir a segurança de circulação e a sustentabilidade do ambiente rodoviário.

A circulação em regime livre é definida pelo intervalo temporal entre veículos sucessivos. O HCM (TRB, 2010) sugere que um intervalo (*headway*) de 3 segundos é suficiente para que o veículo seguidor circule em regime livre. Este valor não reúne consenso na literatura, sendo de apontar o trabalho de Lobo *et al.* (2011), desenvolvido para estradas rurais de duas vias em Portugal, no qual o valor de 6 segundos (*gap*) é dado como referência para a circulação em regime livre. Neste trabalho, usa-se o valor de 10 segundos (*gap*), de modo a indubitavelmente garantir a consideração de veículos livres para o cálculo da FFS.

## 2. RECOLHA DE DADOS

### 2.1. Abordagem experimental

Existem diversas metodologias que podem ser adotadas para o estudo das velocidades, dependendo das variáveis a serem consideradas. Pode-se recorrer a estudos naturalísticos ou realísticos e à utilização de veículos instrumentados ou de simuladores de condução.

O presente artigo analisa a velocidade média de percurso adotada num conjunto de troços de estrada com diferentes secções transversais. O recurso ao simulador de condução permite um elevado nível de controlo sobre as variáveis (Bella, 2005), revelando-se a ferramenta mais

adequada para avaliar o comportamento dos condutores em face da variação das características do perfil transversal. Neste estudo, utilizou-se o simulador estático de condução DriS, instalado no Laboratório de Análise de Tráfego da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Foram seleccionados dois troços de estrada, cada um com 3 km de extensão, pertencentes às estradas N 105-2 e N 222, situadas nos arredores da cidade do Porto. Estas estradas representam dois tipos distintos de traçado. Enquanto que a primeira é mais sinuosa e apresenta uma velocidade de projeto de 40 km/h, na segunda é possível a prática de uma condução menos exigente, tendo como velocidade de projeto 80 km/h. Ambos os troços foram reproduzido no DriS, possibilitando a comparação da influência das larguras do perfil transversal na FFS entre estradas com padrões geométricos bastante distintos. É expectável que os efeitos do perfil transversal sejam mais significativos para velocidades mais elevadas.

Um conjunto de 15 condutores percorreu os cenários reproduzidos no DriS, compostos por sucessivos troços de 3 km de extensão, cada um deles contendo uma diferente combinação de larguras de via e berma. Foram previstos troços intermédios com 100 m de extensão em alinhamento reto que permitissem transições suaves de perfil transversal entre os sucessivos troços de 3 km. As diferentes combinações de larguras de via e berma e a respetiva sequência de apresentação aos condutores do DriS está representada na Tabela 2.

**Tabela 2:** Sequência de apresentação de perfis transversais no DriS

Sequência de cenários								
Largura de via [m]	N 105-2				N 222			
	Largura de berma [m]							
	0,3	0,8	1,2	1,8	1,2	1,8	2,2	2,5
2,7	9	8	10	12	9	8	10	12
3,0	7 (II; III)	1	2	11	7	1	2	11
3,3	4	3 (I)	13	15	4	3	13	15
3,6	6	5	16	14	6	5	16 (I; II)	14 (III)

Obs: I, II, III são os perfis transversais utilizados para validação com velocidades pontuais recolhidas em ambiente real.

Os valores considerados para as larguras de via e berma foram escolhidos segundo o HCM (TRB, 2010) (Tabela 1), bem como de acordo com os perfis transversais usualmente presentes nos tipos de estradas em estudo. De modo a evitar qualquer padrão na variação do perfil transversal, optou-se por uma sequência de apresentação escolhida aleatoriamente. Para cada tipo de estrada, os 16 cenários foram percorridos em sequências de 4, evitando-se assim a fadiga e a habituação ao traçado por parte dos condutores do DriS.

Como forma de melhorar o realismo do ambiente virtual gerado, foi contemplada a existência de tráfego no sentido oposto e de vegetação à margem da estrada. Não foram introduzidos outros veículos no sentido da circulação experimental, de modo a que a velocidade média de percurso correspondesse à FFS.

## 2.2. Descrição das variáveis

As variáveis consideradas neste estudo foram obtidas a partir da posição espacial e temporal do veículo simulado.

Inicialmente, foram removidos os condutores que adotaram um comportamento irrealista, com recurso a três variáveis, determinadas com base no número de vezes que a linha central e/ou a guia lateral são transpostas: (i) **percentagem média do percurso percorrido em erro relativamente à linha central**; (ii) **percentagem média do percurso percorrido em erro relativamente à guia lateral**; (iii) **percentagem média do percurso percorrido em erro** (soma das percentagens anteriores). Para ambas as estradas, o máximo erro total admitido foi de aproximadamente 30%.

Em seguida, foram consideradas a **distância média à linha central** e a **distância média à guia lateral**, que permitem uma análise de sensibilidade sobre o comportamento posicional do condutor na estrada quando confrontado com diferentes envergaduras de perfil transversal. Para determinação destas variáveis, as distâncias correspondentes à transposição dos limites da via foram tidas como negativas.

Foi então desenvolvido um modelo de regressão para avaliar os efeitos das características do perfil transversal na **FFS** (variável dependente). A FFS considerada corresponde à velocidade média de percurso calculada para cada combinação de perfil transversal: comprimento do troço dividido pelo tempo médio de percurso registado pelo DriS para cada condutor.

As variáveis independentes do modelo de regressão são: (i) **largura de via**; (ii) **largura de berma**; (iii) **produto das larguras de via e berma**; (iv) **dummy representativa do tipo de estrada**; (v) **dummies representativas dos diferentes condutores**. O produto das larguras de via e berma permite a avaliação dos efeitos combinados de ambas as variáveis. A variável *dummy* representativa dos dois tipos de estrada possibilita a inclusão de todas as observações recolhidas na mesma regressão, aumentando a dimensão da base de dados. As 14 *dummies* referentes aos condutores expressam a individualidade do comportamento de cada um quando comparado com um condutor-padrão, escolhido aleatoriamente.

Por último, as velocidades obtidas em ambiente virtual foram calibradas. Assim, a **velocidade média pontual** foi observada em ambiente real para três elementos de cada estrada (retas e curvas). Para os mesmos elementos e larguras de via e berma, determinou-se as velocidades em ambiente virtual, o que permitiu a comparação direta entre ambos os ambientes.

### 3. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA

#### 3.1. Modelo de regressão

O modelo proposto assume que a relação entre a FFS e as variáveis independentes é representado por uma função potencial que pode ser linearizada através da extração do logaritmo natural das variáveis contínuas, tal como se apresenta na Equação 2.

$$\ln(FFS) = a + b \ln(l) + c \ln(s) + d \ln(l) \ln(s) + ed_r + \sum_{i=1}^{14} f_i d_{di} \quad (2)$$

em que <i>FFS</i> :	velocidade em regime livre [km/h];
<i>a, b, c, d, e, f<sub>i</sub></i> :	coeficientes de regressão;
<i>l</i> :	largura da via [m];
<i>s</i> :	largura da berma [m];
<i>d<sub>r</sub></i> :	<i>dummy</i> representativa do tipo de estrada;
<i>d<sub>di</sub></i> :	<i>dummy</i> representativa do condutor.

Para avaliar os efeitos do perfil transversal das estradas na FFS, efetuou-se a uma regressão linear multivariada (método dos mínimos quadrados) com utilização da Equação 2. Depois, procedeu-se ao cálculo do valor médio da FFS dos 15 condutores observado para cada combinação de largura de via e berma e para cada tipo de estrada. O menor perfil transversal a partir do qual não se verificam decréscimos na FFS é tido como o cenário base, que serve como referência para a determinação das reduções na FFS causadas por perfis transversais mais estreitos.

### **3.2. Validação dos resultados**

Os troços de estrada testados em ambiente simulado são reproduções de troços integrantes de estradas reais, o que permite a validação dos resultados obtidos no simulador (Bella, 2008). Esta validação passa pela análise comparativa de velocidades pontuais em 6 secções homólogas nos ambientes real e virtual, representadas na Tabela 2 para cada estrada pelos números I, II e III.

Em ambiente simulado, as velocidades pontuais foram automaticamente registadas pelo DriS. Em ambiente real, estas velocidades foram recolhidas com recurso à instalação de dispositivos contadores de tráfego, contendo um sensor de radar Doppler, uma memória de dados Flash RAM e um relógio em tempo real. Os contadores devem ser colocados na secção média dos elementos usados na calibração e a sua presença deve ser o mais dissimulada possível, pois os condutores tendem a abrandar sempre que avistam objetos desconhecidos instalados à margem da estrada. Apenas os veículos com *gap* igual ou superior a 10 segundos foram utilizados no cálculo da FFS em ambiente real.

## **4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA**

### **4.1. Determinação das variáveis**

As variáveis foram determinadas para cada condutor com base nos dados registados pelo DriS no decorrer do estudo experimental. Nas Tabelas 3 e 4, apresenta-se os valores médios das variáveis relativos ao conjunto dos condutores, determinados para cada estrada e cada combinação de largura de via e berma.

**Tabela 3:** Valores médios das variáveis obtidos para a N 105-2

Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8
Largura de via [m]	3	3	3,3	3,3	3,6	3,6	3	2,7
Largura de berma [m]	0,8	1,2	0,8	0,3	0,8	0,3	0,3	0,8
Largura da plataforma [m]	2x3,8	2x4,2	2x4,1	2x3,6	2x4,4	2x3,9	2x3,3	2x3,5
Velocidade média de percurso [km/h]	67,4	71,1	72,9	73,8	71,3	76,0	73,9	73,6
Número de erros								
Linha central	7	6	5	5	3	3	5	7
Guia lateral	10	11	13	13	3	3	1	0
Total	17	17	18	17	6	6	6	7
% Erros								
Linha central	6,7	5,3	4,44	4,7	1,7	1,8	5,1	6,0
Guia lateral	13,1	12,7	18,9	19,0	2,1	2,6	0,4	0,0
Total	19,8	18,0	23,3	23,6	3,7	4,4	5,4	6,0
Distância média [m]								
Linha central	0,6	0,63	0,71	0,70	0,83	0,83	0,58	0,48
Guia lateral	0,49	0,46	0,38	0,38	0,86	0,85	1,10	1,20
Sequência	9	10	11	12	13	14	15	16
Largura de via [m]	2,7	2,7	3	2,7	3,3	3,6	3,3	3,6
Largura de berma [m]	0,3	1,2	1,8	1,8	1,2	1,8	1,8	1,2
Largura da plataforma [m]	2x3	2x3,9	2x4,8	2x4,5	2x4,5	2x5,4	2x5,1	2x4,8
Velocidade média de percurso [km/h]	71,3	74,5	77,6	76,8	75,8	79,8	79,4	79,0
Número de erros								
Linha central	5	6	3	5	2	1	2	1
Guia lateral	10	12	19	13	5	8	5	8
Total	15	18	22	19	7	9	7	9
% Erros								
Linha central	5,4	4,5	2,4	4,2	1,4	1,2	1,8	1,3
Guia lateral	10,6	13,7	29,2	13,6	4,5	10,6	6,0	9,9
Total	16,1	18,2	31,6	17,7	5,9	11,8	7,8	11,2
Distância média [m]								
Linha central	0,47	0,49	0,63	0,50	0,77	0,89	0,77	0,88
Guia lateral	0,32	0,30	0,16	0,29	0,61	0,50	0,62	0,51

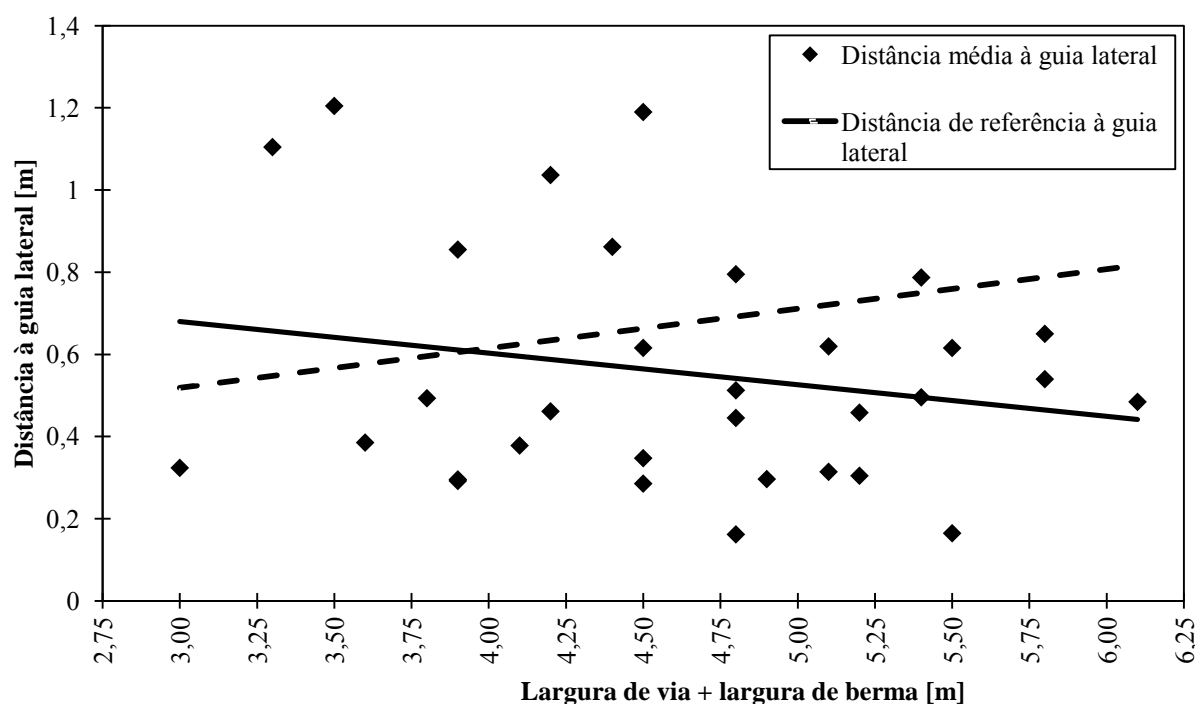
**Tabela 4:** Valores médios das variáveis obtidos para a N 222

Sequência	1	2	3	4	5	6	7	8
Largura de via [m]	3	3	3,3	3,3	3,6	3,6	3	2,7
Largura de berma [m]	1,8	2,2	1,8	1,2	1,8	1,2	1,2	1,8
Largura da plataforma [m]	2x4,8	2x5,2	2x5,1	2x4,5	2x5,4	2x4,8	2x4,2	2x4,5
Velocidade média de percurso [km/h]	106,4	118,3	121,7	123,2	105,80	116,4	115,9	116,2
Número de erros								
Linha central	1	1	1	1	1	1	1	2
Guia lateral	4	2	6	4	1	1	0	0
Total	5	3	7	5	2	2	1	2
% Erros								
Linha central	1,3	1,8	1,5	1,7	1,0	0,8	1,2	3,7
Guia lateral	7,4	6,1	18,2	15,6	2,1	3,0	0,9	0,0
Total	8,7	8,0	19,7	17,4	3,1	3,9	2,0	3,7
Distância média [m]								
Linha central	0,62	0,61	0,75	0,72	0,90	0,89	0,65	0,50
Guia lateral	0,45	0,46	0,31	0,35	0,79	0,79	1,04	1,19
Sequência	9	10	11	12	13	14	15	16
Largura de via [m]	2,7	2,7	3	2,7	3,3	3,6	3,3	3,6
Largura de berma [m]	1,2	2,2	2,5	2,5	2,2	2,5	2,5	2,2
Largura da plataforma [m]	2x3,9	2x4,9	2x5,5	2x5,2	2x5,5	2x6,1	2x5,8	2x5,8
Velocidade média de percurso [km/h]	96,4	111,0	113,1	116,1	95,9	111,4	113,6	116,5
Número de erros								
Linha central	3	3	1	4	1	1	1	1
Guia lateral	6	6	8	5	2	4	2	4
Total	9	8	10	8	3	5	3	5
% Erros								
Linha central	4,2	5,1	2,8	5,5	1,8	1,2	1,5	1,6
Guia lateral	15,6	14,8	28,9	14,7	7,2	13,4	3,3	11,5
Total	19,9	19,9	31,8	20,2	9,0	14,7	4,9	13,1
Distância média [m]								
Linha central	0,47	0,47	0,60	0,46	0,75	0,88	0,71	0,82
Guia lateral	0,29	0,30	0,16	0,30	0,62	0,48	0,65	0,54

Da análise das Tabelas 3 e 4, é possível observar que, tal como seria expectável, as velocidades obtidas na estrada menos sinuosa são mais elevadas.

#### 4.2. Posicionamento dos condutores na secção transversal da estrada

A variação da distância média à guia lateral em função da envergadura do perfil transversal é apresentada na Figura 1. Os valores de referência da distância à guia lateral, correspondentes a um veículo que circule no centro da via, são representados pela linha a tracejado.



**Figura 1:** Distância à guia lateral em função da envergadura do perfil transversal

Verifica-se que, para maiores larguras de perfil transversal, os condutores tendem a aproximar-se da guia lateral. À medida que o perfil transversal se torna mais estreito, os condutores tendem a circular mais próximo da linha central, conservando a distância aos objetos presentes à margem da estrada, numa tentativa de manter a velocidade desejada. Contudo, os condutores acabam por reduzir a velocidade na presença de veículos em sentido oposto, como consequência da aproximação lateral aos mesmos.

#### 4.3. Análise multivariada

Nesta fase, utilizou-se as variáveis obtidas com recurso aos dados registados pelo DriS para efetuar uma regressão linear multivariada. Esta regressão tem como base a Equação 2 e como objetivo a avaliação dos efeitos das larguras de via e berma de ambas as estradas na FFS. Para tal, recorreu-se ao uso do *software* estatístico de análise econométrica *Limdep* (Greene, 1998). Os coeficientes de regressão das variáveis consideradas e correspondentes valores p estão presentes na Tabela 5.



**Tabela 5:** Resultados da regressão linear multivariada

Variável	Coefficiente	Valor p
Constante	4.455	0.000
Perfil transversal:		
Largura de via: $l$	0.143	0.006
Largura de berma: $s$	0.171	0.050
Largura de via x Largura de berma: $ls$	-0.128	0.093
<i>Dummies:</i>		
Estrada: $d_r$	0.385	0.000
Condutor 1: $d_{d1}$	-0.038	0.182
Condutor 2: $d_{d2}$	-0.081	0.005
Condutor 3: $d_{d3}$	-0.049	0.090
Condutor 4: $d_{d4}$	0.002	0.934
Condutor 5: $d_{d5}$	-0.349	0.000
Condutor 6: $d_{d6}$	-0.159	0.000
Condutor 7: $d_{d7}$	-0.159	0.000
Condutor 8: $d_{d8}$	-0.119	0.000
Condutor 9: $d_{d9}$	-0.075	0.009
Condutor 10: $d_{d10}$	-0.133	0.000
Condutor 11: $d_{d11}$	-0.091	0.002
Condutor 12: $d_{d12}$	-0.135	0.000
Condutor 13: $d_{d13}$	-0.086	0.003
Condutor 14: $d_{d14}$	-0.122	0.000
R=0.89		
R <sup>2</sup> =0.79		

A maioria das variáveis são estatisticamente significantes a um nível de 10%, exceto as *dummies* referentes aos condutores 1 e 4. Contudo, os respetivos coeficientes são quase nulos, revelando que o comportamento desses condutores foi similar ao do condutor-padrão.

A qualidade do ajuste é comprovada pelo elevado coeficiente de correlação ( $R=0,89$ ) (Cohen, 1988). O coeficiente de determinação obtido ( $R^2$ ) mostra que 79% da variância da FFS é explicada pela variância das restantes variáveis.

A FFS foi calculada para cada perfil transversal através da média da FFS observada no conjunto dos 15 condutores, quer para a N105-2 (estrada menos mais sinuosa;  $d_r=0$ ), quer para a N 222 (estrada mais sinuosa;  $d_r=1$ ). O teste de Kolmogorov-Smirnov foi efetuado para as 32 amostras (correspondentes às 32 combinações de larguras de via e berma) de 15 valores de velocidade. Verificou-se que os valores médios são representativos das amostras, uma vez que estas seguem uma distribuição normal, para um nível de significância de 5%.

As elasticidades observadas para o valor médio da amostra foram de 0,12% para a largura de via e 0,025% para a largura de berma. Estes valores representam o aumento da FFS induzido pelo incremento em 1% das larguras de via e berma, respetivamente. Mais relevante do que estes factos é a análise das variações de velocidade causadas pelos diferentes perfis transversais. Por isso, a Equação 2 foi aplicada às diversas combinações de larguras de via e berma. As respetivas reduções de velocidade estão presentes na Tabela 6.

**Tabela 6:** Reduções da FFS devido às larguras de via e de berma

Largura de via [m]	Redução da FFS [km/h]								
	N 105-2					N 222			
	Largura de berma [m]								
	0,3	0,8	1,2	1,8	0,3	0,8	1,2	1,8	2,2
2,7	6,8	3,7	2,3	1,0	9,9	5,4	3,4	1,5	0,5
3,0	4,6	2,3	1,4	–	6,7	3,4	2,1	0,7	–
3,3	2,5	1,1	0,6	–	3,7	1,7	0,8	–	–
3,6	0,6	0,0	–	–	0,9	0,0	–	–	–

A análise comparativa entre as Tabelas 1 e 6 permite tecer algumas considerações. Em primeiro lugar, o cenário base, correspondente ao mínimo perfil transversal a partir do qual não se observam significativas variações da FFS ( $<0.5$  km/h), é estabelecido neste estudo para uma largura de via de 3,6 m conjugada com uma largura de berma de 0,8 m, sendo válido para ambos os tipos de estrada. Para perfis transversais mais largos, a FFS passa a sofrer apenas a influência das características ambientais da estrada ou de características geométricas não relacionadas com o perfil transversal. O perfil transversal de base proposto pelo HCM (TRB, 2010) é constituído por uma largura de via de 3,6 m e por uma berma de 1,8 m. De facto, tendo sido este manual de referência desenvolvido para as condições das estradas norte-americanas, onde os veículos são usualmente mais largos que na Europa, é expectável que o perfil transversal mínimo que não afeta a FFS seja mais estreito em Portugal.

É também possível confirmar que perfis transversais mais estreitos produzem maiores efeitos na FFS, efeitos que vão gradualmente diminuindo com o incremento das larguras de via e de berma. O presente trabalho conduziu a diferentes valores de redução de velocidade face ao HCM (TRB, 2010). As reduções de velocidade propostas na Tabela 1 para perfis transversais mais estreitos são proporcionais às encontradas na Tabela 6 para a estrada menos sinuosa (N 222). Além do mais, apesar das referidas diferenças entre cenários base, a redução de velocidade observada neste estudo para o perfil transversal mais estreito da N 222 é semelhante ao valor proposto pelo HCM (TRB, 2010): aproximadamente 10 km/h.

As características geométricas da estrada mais sinuosa (N 105-2) são significativamente diferentes das características das estradas consideradas pelo HCM (TRB, 2010), que atenta em estradas com velocidades operacionais entre 70 e 110 km/h. Contudo, a comparação entre os dois tipos de estradas analisados neste estudo mostra que os efeitos da largura do perfil transversal na FFS dependem da ordem de grandeza das velocidades praticadas. A velocidade média de percurso observada no DriS para a N 105-2 foi de aproximadamente 68% do valor registado para a N 222. Esta proporção é similar à observada entre ambas as estradas para as reduções de velocidade nas correspondentes combinações de larguras de via e berma.

A Tabela 6 permite ainda retirar outra conclusão importante sobre os efeitos causados pela variação das larguras de via e berma na FFS: não são cumulativos. Ou seja, a redução de velocidade causada pela diminuição conjugada das larguras de via e de berma é superior à soma dos respetivos efeitos individuais. Os efeitos marginais inerentes às larguras de via e berma podem ser obtidos pela derivação da função de regressão (Equação 2) relativamente às larguras de berma ( $\ln(s)$ ) ou de via ( $\ln(l)$ ), respetivamente. A título de exemplo, é possível observar na Tabela 6 que a redução da largura de berma de 0,8 para 0,3 m varia de acordo com a largura de via. Da mesma forma, a redução da via de 3,6 para 2,7 m depende da

variação da berma. Pelo contrário, o HCM (TRB, 2000) não preconiza diferentes reduções da FFS entre os efeitos causados pela diminuição conjunta das larguras de via e berma e a soma dos respectivos efeitos individuais. A redução de velocidade entre dois intervalos sucessivos de largura de via contidos na Tabela 1 é independente da largura de berma, e vice-versa.

#### 4.4. Comparação da velocidade pontual entre os ambientes real e virtual

Para validar os resultados obtidos no DriS, efetuou-se a comparação entre velocidades pontuais observadas em ambiente virtual e em ambiente real. Para cada secção de controlo, foram aferidas: (i) as velocidades médias pontuais em ambiente real e simulado ( $SS_r$  e  $SS_s$ ); (ii) a diferença entre  $SS_s$  e  $SS_r$ ; (iii) os desvios padrões das velocidades em ambiente real e simulado ( $SD_r$  e  $SD_s$ ). O tamanho da amostra em ambiente real ( $N_r$ ) depende do tráfego observado em cada ponto de controlo. O tamanho da amostra em ambiente simulado ( $N_s$ ) corresponde aos 15 condutores do DriS. Estas variáveis estão presentes na Tabela 7, onde se mostra ainda os raios e as extensões dos elementos que integram as secções de controlo.

**Tabela 7:** Comparação da velocidade pontual entre os ambientes real e simulado

Secção de controlo (Raio; Extensão) [m]	$SS_r$ [km/h]	$SD_r$ [km/h]	$SS_s$ [km/h]	$SD_s$ [km/h]	$N_r$	$N_s$	$SS_s - SS_r$ [km/h]
N 105-2							
I ( $\infty$ ; 334)	54,2	16,1	92,7	16,3	164	15	38,7
II (150; 80)	46,8	13,2	77,1	9,9	133	15	30,3
III ( $\infty$ ; 473)	76,3	18,6	98,6	11,2	112	15	23,6
N 222							
I (545; 282)	71,5	16,3	113,7	17,6	323	15	42,2
II ( $\infty$ ; 240)	76,9	16,8	119,4	20,3	325	15	42,4
III ( $\infty$ ; 408)	76,6	13,7	115,7	19,7	330	15	38,7

Apesar das diferenças no tamanho da amostra entre os ambientes real e simulado, a dispersão estatística observada para  $SS_r$  e  $SS_s$  é equiparável. Na N 222, onde as características ambientais podem produzir efeitos significativos na circulação, a dispersão das velocidades é menor em ambiente real. Na N105-2, onde os condutores circulam fortemente condicionados pela geometria da diretriz, as diferenças na dispersão das velocidades são mais reduzidas.

Em cada secção de controlo nota-se alguma similaridade de comportamento dos condutores entre os ambientes real e virtual, dado que as amostras são normalmente distribuídas para um nível de significância de 5% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

A Tabela 7 mostra que, para cada estrada, a ordenação das secções de controlo pela velocidade resulta na mesma sequência para ambos os ambientes. É também possível constatar que os condutores adotam velocidades mais elevadas no ambiente simulado face ao ambiente real. Contudo, este facto tende a refletir uma translação dos valores absolutos de velocidades, o que não afeta as conclusões deste estudo. Por isso, consideram-se válidos os resultados obtidos pelo DriS, quando analisadas as diferenças relativas e absolutas entre velocidades praticadas em ambiente real e virtual. A prática de velocidades mais elevadas em ambiente virtual é expectável, face à ausência dos efeitos da aderência e do comportamento dinâmico da carroçaria. Na N 222, a diferença nas velocidades praticadas entre os ambientes simulado e real rondam os 40 km/h. Na N105-2, este valor baixa para os 30 km/h, devido às restrições impostas pelo traçado mais sinuoso.

#### 4. CONCLUSÕES

Para além do presente artigo, já estudos anteriores haviam sugerido que a envergadura do perfil transversal das estradas tem influência na FFS praticada pelos condutores. O HCM (TRB, 2010) propõe diversos valores de redução de velocidade causada por diferentes larguras de via e de berma. Contudo, os resultados obtidos neste artigo diferem das propostas daquele manual em três principais aspetos. Em primeiro lugar, o perfil transversal de base, definido como a mínima combinação de larguras de via e de berma que não induz reduções na FFS, é formado por uma via de 3,6 m e uma berma de 0,8 m de largura (em vez dos correspondentes 3,6 e 1,8 m propostos pelo HCM (TRB, 2010)). Em segundo lugar, e como consequência de um menor perfil transversal de base, as reduções de velocidade determinadas para menores perfis transversais são também diferentes das preconizadas pelo HCM (TRB, 2010). Contudo, a redução obtida para o perfil transversal mais estreito considerado (via de 2,7 m e berma de 0,3 m de largura) é de cerca de 10 km/h em ambos os estudos. Por fim, os efeitos na FFS causados pela largura de via são dependentes da largura de berma e vice-versa, não se revelando cumulativos entre si. Verifica-se que uma redução conjugada da largura de via e berma produz uma redução na FFS superior à soma dos respetivos efeitos considerados individualmente. Apesar de o HCM (TRB, 2010) ser um manual de referência amplamente adotado à escala global, não deve ser ignorado o facto de ter sido desenvolvido para as condições das estradas norte-americanas. Por isso, a sua aplicação deve ser cuidadosa quando se trata de redes viárias com características geométricas e ambientais bastante distintas, tais como a portuguesa ou a de outro país europeu.

A comparação entre os dois tipos de estrada incluídos neste estudo permite concluir que a influência do perfil transversal de uma estrada na FFS depende da ordem de grandeza das velocidades observadas nessa estrada.

A validade dos resultados obtidos em ambiente virtual confirma que os simuladores de condução constituem uma ferramenta flexível e fiável que pode ser usada no estudo e reprodução de situações realísticas de tráfego.

#### AGRADECIMENTO

O presente estudo foi elaborado no âmbito do projecto *SAFESPEED* – PTDC/TRA/72998/2006 – financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bella, F. (2005) *Operating speed predicting models on two-lane rural roads from driving simulation*. Proceedings of the 84th Annual Meeting, Transportation Research Board, Washington, 2005.
- Bella, F. (2008) *Driving simulator for speed research on two-lane rural roads*. Accident Analysis and Prevention 40, pp. 1078-1087, Elsevier.
- Cohen, J. (1998) *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences* (2ª ed.). Lawrence Erlbaum Associates Inc., Hillsdale, NJ, USA.
- Greene, W. H. (1998) *Limdep Version 7.0 User's Manual* – Revised Edition. Econometric Software, Inc., Plainview, NY.
- Gross, F., Brustlinm, K. (2009) *Safety Evaluation of Lane and Shoulder Width Combinations on Rural, Two-Lane Undivided Roads*. pp. 09-032, FHWA-HRT.
- Lobo, A., P. Jacques, M. A., Rodrigues, C.M., Couto, A. (2011) *Free Gap Evaluation for Two-Lane Rural Highways*. Transport Research Record (in press), National Research Council, Washington D.C..
- Swov (2008) *Speed Choice: the influence of man, vehicle, and road*. Institute for Road Safety Research, Leidschendam.
- TRB (2010) *Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., 2010.