

MODELACAO DA VELOCIDADE SEGURA RECORRENDO AO JULGAMENTO DE ESPECIALISTAS

Ana M. Bastos Silva

Alvaro Seco

Universidade de Coimbra

Departamento de Engenharia Civil

Carlos Magalhães Real

Instituto Politécnico de Leiria

Departamento de Engenharia Civil

RESUMO

As estradas de importância secundária caracterizam-se por atravessar diferentes ambientes rodoviários os quais justificam a imposição de diferentes limites de velocidade máxima. Muitos países continuam sem a definição de critérios lógicos ou de ferramentas capazes de sustentar tecnicamente essa definição. Nessa óptica, o presente artigo centra-se no desenvolvimento de um modelo estatístico capaz de suportar objectivamente o processo de definição da velocidade segura para um determinado trecho viário, tendo por base as suas características geométricas e funcionais prevaletentes. O desenvolvimento do modelo é baseado em técnicas de correlação e de regressão múltipla, suportado pela criação de uma base de dados real. Essa base de dados integra a opinião de um conjunto de especialistas, a quem foi pedida a avaliação da velocidade segura ao longo de um conjunto de itinerários, sendo o seu julgamento baseado no nível de conflituosidade local e nas condições de funcionamento prevaletentes.

ABSTRACT

Secondary roads are characterized by different cross-section road environments that justify the imposition of different legal speed limits. Many countries still lack the definition of logical criteria or tools capable of technically supporting this definition. In this line of action, this article focuses on the development of a mathematical model capable of supporting the process of objectively defining the legal maximum safe speed for a given road section, based on their main geometric and functional characteristics prevailing. The model development is based on correlation techniques and multiple regressions which were supported by the creation of a real database. This database includes the opinions of a group of specialists, who were asked to evaluate the safe speed over a set of routes, based on their judgments about the level of conflict and local prevailing operating conditions.

1. INTRODUÇÃO

A rede secundária de estradas de um país serve normalmente de apoio à rede primária na distribuição do tráfego pelas regiões, pelo que uma preocupação de base que lhe assiste é promover uma circulação contínua e segura. É por isso planeada e projectada para assegurar fluxos contínuos e níveis de fluidez elevados, sendo os trechos de estradas frequentemente sujeitos a limites de velocidade máxima pouco restritivos.

Por essa razão e até à década de 80, as recomendações técnicas valorizavam a definição de soluções geométricas e funcionais baseadas fundamentalmente em preocupações operacionais e sem terem em consideração a sua integração no meio rodoviário envolvente (Neuman, *et al.*, 2002). Contudo o aparecimento e o crescimento das povoações de forma espontânea ao longo das vias, têm obrigado a repensar essa filosofia de concepção e de gestão da rede de estradas. Actualmente essas vias caracterizam-se por atravessar ambientes rodoviários que passam desde o puro rural, pela habitação dispersa, até ao domínio urbano consolidado.

A definição dos locais de fronteira apropriados à imposição de alterações ao regime de circulação e, por consequência, à alteração dos limites de velocidade máxima, revela-se particularmente complexa. A agravar, muitos países confrontam-se ainda com a inexistência de quaisquer disposições técnicas ou normativas, que apoiem a atribuição dessa velocidade de

forma coerente e objectiva. A infraestrutura rodoviária é assim caracterizada por uma falta de uniformidade e de rigor nos tratamentos, induzindo assim à geração de problemas de segurança rodoviária e à tendencial descredibilização da sinalização local. Em consequência, os níveis de sinistralidade neste tipo de estradas mantêm-se elevados sendo a velocidade apontada como uma das principais causas dos acidentes e da sua gravidade (TRB, 1998; ANSR, 2010; Stuster e Coffman, 1998).

Nessa linha de acção, alguns países Europeus, Estados Unidos, Canada e Austrália, ao longo das três últimas décadas têm vindo a defender a necessidade de impor limites de velocidade concordantes com as naturais expectativas dos condutores numa óptica integrada de construção de estradas auto-explicativas (Stamatiadis, 2001; DfT, 2006; Neuman *et al.*, 2002; Mackey, 2004; Fitzpatrick et al, 2003). Hoje em dia, é consensualmente aceite que apenas uma avaliação integrada é capaz de ter em consideração de forma coerente e lógica os interesses e necessidades associados aos diferentes utilizadores da estrada.

Os primeiros exemplos de aplicação deste tipo de abordagem centraram-se na definição dos limites de velocidade concordantes com a prática corrente local, e portanto baseados na medição do percentil 85 da distribuição das velocidades. Mas a integração de outras preocupações para além da normal corrente de tráfego, esteve na base do desenvolvimento de outros conceitos e de iniciativas de gestão da velocidade em diversos países, salientando-se (Mackey, 2004): –Ville plus sûre, quartiers sans accidents”, em França; –Environmentally adaptet through roads”, na Dinamarca; –Village Speed Control Working Group”, no Reino Unido; –Environmental Adaptation of the Main Street in Rural Towns”, na Austrália e, mais recentemente o projecto (TRB’s NCHRP 20-05 - Topic 40-08) –Effective Speed Reduction Techniques for Rural High to Low Speed Transitions” nos USA. Estas estratégias de gestão da velocidade justificaram a redefinição dos limites de velocidade, seleccionando valores adequados às características próprias de cada trecho e da sua envolvente, equilibrando as necessidades de garantir simultaneamente condições de segurança com e as de mobilidade (DfT, 2006).

Já em 2000 surgem novas metodologias de abordagem, baseadas na definição de ferramentas e de modelos de cálculo, suportados por factores físicos e operacionais. São exemplos deste tipo de ferramentas a família de aplicações Xlimits de origem australiana (e posteriormente adaptados para os EUA e Nova Zelândia), os quais permitem estimar o limite máximo de velocidade em função de um conjunto alargado de variáveis ligadas à infraestrutura, ao uso do solo, condições de operação e sinistralidade local. Estes modelos para além de adaptados às características dos países de origem exigem a disponibilização de um conjunto alargado de informação, nem sempre disponível. É o caso do histórico de acidentes locais ou da distribuição das velocidades que, de forma geral, é difícil, ou economicamente insustentável de obter, para cada trecho em análise.

Em Portugal, a definição da velocidade máxima continua a ser baseada no regime de circulação estabelecido no Código da Estrada, podendo esse limite ser reduzido em situações onde o grau de conflituosidade e risco o justifique. A inexistência de critérios técnicos, lógicos e coerentes leva a que essa redução seja feita de forma casuística, ficando maioritariamente dependente de critérios pessoais. Em consequência, o país está pautado por uma falta de uniformidade no tratamento das situações, sendo comum encontrar limites de velocidade desajustados às exigências locais, resultando em claras violações às expectativas

dos condutores. As vias inter-urbanas, pela diversidade de ambientes que atravessam e, consequentemente, pelas diversas funções que desempenham, apresentam-se como a tipologia ideal para a implementação de estratégias de gestão de velocidades capazes de atender às particularidades e especificidades de cada trecho.

Nessa linha de acção, a presente comunicação centra-se no desenvolvimento de um modelo matemático para apoio à definição dos limites de velocidade segura em trechos de estrada com duas vias, com uso misto, ou seja que atravessem diferentes ambientes rodoviários e envolvam a presença de outros utilizadores. O modelo foi desenvolvido no âmbito do projecto de investigação SAFESPEED, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia. São identificadas as variáveis e factores considerados como os mais relevantes na definição desses limites, tendo por base a experiência internacional nesta matéria. O modelo desenvolvido assenta na aplicação de técnicas de regressão múltipla e revelou-se capaz de estimar, de forma lógica e coerente, a velocidade segura mais adequada a cada trecho, tendo por base um conjunto de variáveis explicativas facilmente mensuráveis ligadas à estrada e sua envolvente.

2. PRESSUPOSTOS METODOLÓGICOS E METODOLOGIA ADOPTADA

O desenvolvimento do presente trabalho assenta na premissa de que a velocidade máxima a estabelecer em cada trecho, deverá resultar da conjugação independente de dois factores relevantes: (i) a conflituosidade local relacionada com o uso do solo e com a interactividade e atrito associados às actividades que se desenvolvem marginalmente à estrada e, (ii) as características físicas prevalentes do traçado e da sua envolvente. A velocidade máxima legal, em cada trecho, deverá corresponder ao menor destes dois valores (Figura 1).

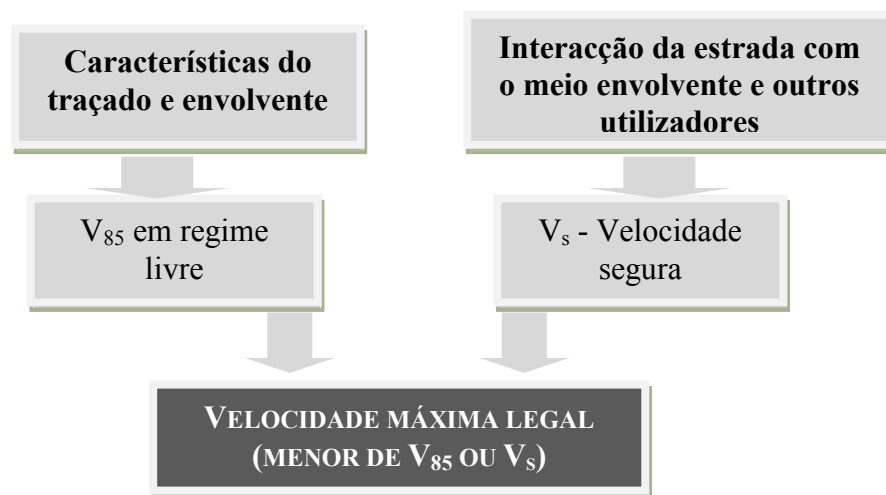


Figura 1: Metodologia para identificação da velocidade máxima legal em cada trecho

Importa ainda ter presente que a procura de traçados auto-explicativos deverá exigir a definição de soluções globais combinadas devidamente ajustadas e concordantes com as expectativas naturais dos condutores, pelo que idealmente este processo deverá integrar indicadores de controlo. De facto, quando se compara o valor estimado ou medido da V_{85} com o da V_s estimado, duas situações podem ocorrer (Figura 2): (1) sempre que a V_{85} é inferior à V_s , significa que a velocidade máxima é imposta pelas condicionantes do traçado (por exemplo um traçado muito sinuoso, ou com inconsistências), estando salvaguardas as

expectativas dos condutores; (2) sempre que a V_{85} é superior à V_s , verifica-se que a velocidade máxima é estabelecida em função do nível de conflituosidade local, contudo o traçado geral da estrada potencia a prática de velocidades superiores o que, em termos práticos, se traduz na geração de situações incongruentes e em problemas sérios de segurança. Neste tipo de situações importa promover a adaptação das características do traçado, designadamente através da aplicação de medidas de controlo físico da velocidade compatíveis com a velocidade pretendida para o local. As medidas de acalmia encontram aqui um dos seus domínios privilegiados de aplicação.

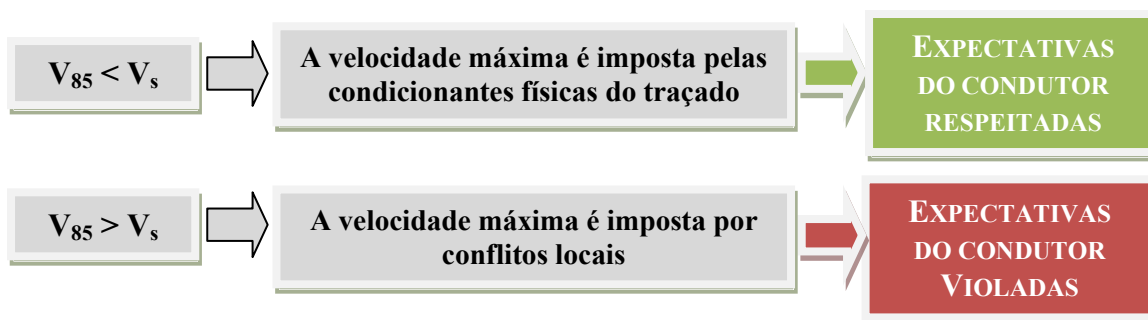


Figura 2: Avaliação da qualidade do ajuste das características da infraestrutura com a Velocidade máxima estabelecida

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

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

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

Foram seleccionados três itinerários de estradas nacionais, todos caracterizados pela

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

De modo a simplificar a análise optou-se por considerar que os atravessamentos de localidades são sub-divididos em 3 trechos fundamentais (Figura 3): (i) o trecho rural e de aproximação ao espaço urbano, caracterizado pela inexistência de actividade urbana e ao qual se atribuiu a velocidade máxima estabelecida pela lei Portuguesa (90km/h); (ii) o trecho de transição localizado entre os trechos de aproximação e o urbano, caracterizado pelo surgimento de algumas edificações nos espaços marginais de forma dispersa, mantendo algum afastamento em relação à faixa de rodagem. Foi-lhe atribuída a velocidade de referência de 70km/h; e (iii) o trecho urbano caracterizado pela existência de uma densidade edificatória elevada e por uma actividade marginal acentuada relacionada com a presença de acentuada de outros utilizadores (tais como peões e ciclistas) assim como de movimentos de acesso associados às actividades locais (acessos a propriedades, inversões de marcha, estacionamento, etc.). A velocidade máxima atribuída a estes trechos segue mais uma vez a velocidade estabelecida pelo Código da Estrada Português em regime urbano, ou seja 50 km/h.



Figura 3: Divisão do trecho de atravessamento em zonas de actuação

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

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

3. DESENVOLVIMENTO DE MODELOS DE ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE SEGURA

3.1. Identificação das variáveis

A selecção das variáveis a adoptar mereceu uma análise detalhada e criteriosa particularmente apoiada pela análise de estudos publicados, publicados designadamente no âmbito do desenvolvimento da família de aplicações Xlimits.

Verifica-se que, ao longo do tempo, o aperfeiçoamento desses modelos tem vindo a exigir um número cada vez maior de variáveis e de factores, os quais nem sempre são fáceis de medir ou de obter. Essas variáveis procuram caracterizar não só a estrada e as suas condições de operação, mas também a sua envolvente próxima, abrangendo as seguintes áreas fundamentais (Austroads, 2005; Greibe *et al.*, 1999):

- Condições de operação (volumes de tráfego, percentis 50 e 85 da velocidade de operação);
- Características físicas prevaletentes da estrada (hierarquia da via, caracterização do perfil transversal, traçado em planta e perfil longitudinal, violações à homogeneidade do traçado, existência de passeios, inclinação dos taludes, faixa livre de obstáculos, etc.);
- Características da envolvente (densidade habitacional; distância das habitações à faixa de rodagem, etc.);
- Conflitos relacionados com acessos e intersecções (densidade e tipo de acessos e de intersecções);
- Presença de outros utilizadores ou actividades locais (peões, ciclistas, estacionamento, travessias pedonais, paragens de BUS, etc.);
- Historial de acidentes (evolução no tempo dos acidentes e sua tipologia e gravidade);
- Outras variáveis (velocidades máximas impostas; iluminação pública, etc.).

Como se pode constatar a lista de variáveis reportadas nesses trabalhos é extremamente longa e exigente, o que, por vezes, torna impraticável a aplicação deste tipo de modelos a outros países, onde muitas destas variáveis são inexistentes ou difíceis de obter, como é caso de Portugal. Importa contudo ter presente que uma aplicação do tipo Xlimits, ou USlimits inclui a estimação da V_{85} , da V_s assim como integra critérios de avaliação da sua adequação às expectativas do condutor, tal como apresentados na Figura 2.

Importa contudo ter em consideração que a facilidade e aplicabilidade generalizada do modelo depende substancialmente da capacidade do mesmo justificar a variância observada, por recurso a um número reduzido de variáveis, as quais devem ainda ser robustas, acessíveis ou fáceis de obter. Assim e tendo presente os pressupostos metodológicos apresentados nas Figuras 1 e 2, o presente trabalho, apoia-se no princípio de que a maioria das variáveis relacionadas com a operacionalidade e com as características prevaletentes do traçado estão incorporadas na estimação da V_{85} ou no processo de controlo do ajuste das características da infraestrutura ao grau de conflituosidade local, o que permitiu reduzir substancialmente o número de variáveis integradas na análise.

Assim e tendo por base, a bibliografia da especialidade consultada (Austroads, 2005; Greibe *et al.*, 1999) e a realidade nacional, foram consideradas 14 variáveis caracterizadoras das vias e da sua envolvente (tabela 1). Apesar de ser um conjunto limitado, considera-se que as variáveis seleccionadas respondem aos objectivos do trabalho, salvaguardando ainda a

facilidade de aplicação do modelo. As variáveis V_1 a V_{11} foram registadas em unidades (número de acessos, número cruzamentos, número de postos de combustível, etc.). Por sua vez, as variáveis V_{12} , V_{13} e V_{14} foram tratadas como variáveis binárias, assumindo o valor 1 sempre que é verificada a ocorrência da variável ou de 0 se a mesma não é verificada. No caso das variáveis V_{13} e V_{14} a sua definição assentou no julgamento de uma equipa independente que avaliou o nível de restrições laterais, tendo por base a densidade edificatória e proximidade das edificações em relação à estrada. A recolha de dados foi realizada de forma desagregada por sentido de circulação, pelo que à excepção da variável V_8 , todas as variáveis foram desdobradas em direita (D) e esquerda (E).

Tabela 1: Variáveis consideradas na análise

SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	SÍMBOLO	DESCRIÇÃO
V1	Nº de cruzamentos;	V8	Nº de atravessamento pedonais formais;
V2	Nº de acessos a garagens;	V9	Nº de postos de abastecimento de combustível;
V3	Nº de acessos motorizados a terrenos;	V10	Nº de semáforos de controlo velocidade;
V4	Nº de acessos a lugares de estacionamento;	V11	Nº de acesso a parques;
V5	Nº de acessos a caminhos pedonais;	V12	Existência/ausência de passeios;
V6	Nº de acessos pedonais a casas;	V13	Nível médio de restrições laterais;
V7	Nº de paragens BUS;	V14	Nível elevado de restrições laterais

3.2. Modelo de regressão múltipla

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

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

Onde:

V_s : Velocidade segura estimada [km/h]

B_0 : Coeficiente independente

B_j : com $j = 1, \dots, k$ são os coeficientes de regressão (parciais) associados às variáveis x_j

x_i : variáveis independentes, com $j = 1, \dots, k$,

ε : é o erro aleatório.

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

Os trabalhos de modelação iniciaram-se através da introdução de todas as variáveis no modelo, sendo posteriormente avaliado o efeito associado à eliminação combinada de

algumas das variáveis. A amostra global integrou 450 casos por condutor (correspondentes aos 45k m x 5 (segmentos de 200m) x 2 (2 sentidos de circulação)) o que totalizou 1800 casos de estudo. Os resultados obtidos e a robustez da relação foram sendo avaliados progressivamente tendo por base os indicadores de ajustamento do modelo e da coerência dos resultados designadamente através da análise do sinal associado aos coeficientes de regressão parciais. Para além do coeficiente de determinação ajustado, foram ainda tidos em consideração o peso assumido por cada variável (β - parâmetro com os dados normalizados) e o correspondente nível de significância (p -value). O modelo final seleccionado representa o modelo que sem perda significativa da capacidade de ajuste aos valores observados (diminuição do $R^2_{Ajust.}$), inclui unicamente as variáveis mais robustas e que se revelaram estatisticamente significativas, de forma consistente, na maioria dos modelos desenvolvidos.

Os primeiros modelos de regressão linear múltipla assentaram no uso da informação o mais desagregada possível e considerando todas as variáveis independentes, segregadas em função do sentido de circulação (Tabela 2).

Tabela 2: Modelos I – Resultados da modelação com as variáveis desagregadas por sentido de circulação

MODELO	MODELO I.A		MODELO I.B		MODELO I.C		MODELO I.D	
ESPECIALISTA	A		B		C		D	
Coef. Determinação	$R^2=0,6284$		$R^2=0,6078$		$R^2=0,6591$		$R^2=0,5163$	
$R^2_{Ajust.}$	$R^2=0,6191$		$R^2=0,5989$		$R^2=0,6505$		$R^2=0,5105$	
Coef. Independente	$B_0 = 86,17$		$B_0 = 84,13$		$B_0 = 89,54$		$B_0 = 82,82$	
	B	β	B	β	B	β	B	β
V _{1D}	-4,25	-0,15	-4,65	-0,16	-2,53	-0,11	-4,48	-0,19
V _{1E}	-3,21	-0,11			-2,38	-0,10	-5,33	-0,22
V _{2D}			-1,51	-0,08				
V _{3D}	-1,45	-0,13	-1,09	-0,09	-1,22	-0,13	-1,70	-0,18
V _{3E}	-1,35	-0,12	-1,40	-0,12	-1,33	-0,15	-1,85	-0,20
V _{4E}					-0,48	-0,06		
V _{7E}			-5,00	-0,10				
V ₈					-3,02	-0,08		
V _{10D}			-5,15	-0,10				
V _{10E}	-6,31	-0,13						
V _{12D}	-4,99	-0,11			-5,77	-0,16	-5,25	-0,14
V _{12E}	-4,77	-0,11					-7,44	-0,20
V _{13D}	-7,64	-0,18	-13,57	-0,31	-4,87	-0,14	-3,80	-0,11
V _{13E}	-5,18	-0,13	-9,10	-0,21	-4,25	-0,13		
V _{14D}	-7,43	-0,16	-11,42	-0,23	-7,29	-0,19		
V _{14E}	-5,51	-0,12	-5,85	-0,12	-7,80	-0,21		

O modelo desagregado foi desenvolvido para cada um dos quatro especialistas (A, B, C e D) tendo por base o método regressivo, que permitiu ir rejeitando progressivamente as variáveis que não apresentaram significância estatística ao nível de confiança de 95%. Os resultados obtidos (tabela 2) mostram uma grande consistência dos resultados entre os modelos relativos aos 4 especialistas. À excepção do observador D, os coeficientes de determinação ajustados de cada modelo são bastante próximos, compreendidos entre 0,6 e 0,65. Também a proximidade entre os valores dos coeficientes de determinação e o ajustado revela que todas

as variáveis introduzidas no modelo são estatisticamente significativas e trazem benefícios à qualidade final do modelo. Foi ainda possível verificar que, independentemente do modelo, todos os coeficientes associados às variáveis eram negativos, demonstrando que o efeito de cada variável no valor da V_s do trecho, é penalizador. De facto, o coeficiente independente, varia entre os 82,82 e os 89,54, valores bastante próximos dos 90 km/h, assumidos como a velocidade máxima em zona rural, demonstrando que esse valor foi considerado pelo modelo como valor de referência. O modelo relativo ao observador D foi o que obteve menor coeficiente de determinação. Contudo, é notória a consistência das variáveis independentes nos quatro modelos, o que releva a robustez dessas variáveis enquanto variáveis explicativas da V_s . As variáveis relativas aos diferentes tipos de acessos revelaram-se de forma geral, estatisticamente significativas, assim como as relativas ao grau de restrição lateral e a existência de passeio.

Um outro aspecto que importa salientar prende-se com o facto de maioritariamente, as variáveis consideradas estatisticamente significativas, o serem em relação aos 2 sentidos de circulação. Optou-se assim por testar o ajustamento do modelo, tendo por base as variáveis explicativas introduzidas de forma agregada em termos de sentido de trânsito (tabela 3).

Tabela 3: Modelos II - Resultados da modelação com as variáveis agregadas por sentido de circulação

MODELO	MODELO II.A		MODELO II.B		MODELO II.C		MODELO II.D	
ESPECIALISTA	A		B		C		D	
Coef. de determinação	$R^2=0,6250$		$R^2=0,6030$		$R^2=0,6508$		$R^2=0,5162$	
$R^2_{Ajust.}$	$R^2=0,6228$		$R^2=0,5967$		$R^2=0,6469$		$R^2=0,5114$	
Coef. Independente	$B_0 = 86,19$		$B_0 = 84,33$		$B_0 = 89,65$		$B_0 = 82,95$	
Coeficientes de Regressão	B	β	B	β	B	β	B	β
V_1	-3,62	-0,21	-3,54	-0,20	-2,88	-0,20	-4,85	-0,33
V_2	-0,72	-0,07	-0,84	-0,08				
V_3	-1,38	-0,21	-1,38	-0,20	-1,38	-0,25	-1,73	-0,31
V_9			-11,44	-0,10				
V_{10}	-3,30	-0,12	-2,66	-0,09				
V_{12}	-4,71	-0,19			-4,33	-0,22	-6,24	-0,30
V_{13}	-6,46	-0,24	-10,68	-0,37	-4,11	-0,18	-2,69	-0,12
V_{14}	-5,50	-0,21	-8,01	-0,29	-7,11	-0,33		

Os resultados evidenciam uma simplificação do modelo através da redução significativa do número de regressores, sem perda significativa em termos de qualidade do ajuste. Mais uma vez, todos os coeficientes de regressão parciais se apresentam negativos, sendo que os coeficientes independentes dos modelos se aproximam de 85. Também nesta série de modelos (tabela 3) se sublinha a grande consistência dos regressores integrados nos modelos dos 4 especialistas, sendo que as variáveis relativas às condições de restrição lateral e ao número de acessos, são as variáveis que, de forma consistente, se mantêm em todos os modelos. Os resultados evidenciam uma simplificação do modelo através da redução significativa do número de regressores, sem perda significativa em termos de qualidade do ajuste. Mais uma vez, todos os coeficientes de regressão parciais se apresentam negativos, sendo que os coeficientes independentes dos modelos se aproximam de 85. Também nesta série de modelos (tabela 3) se sublinha a grande consistência dos regressores integrados nos modelos dos 4

especialistas, sendo que as variáveis relativas às condições de restrição lateral e ao número de acessos são as variáveis que, de forma consistente, se mantêm em todos os modelos.

O passo final do trabalho consistiu na agregação e na eliminação de outras variáveis que, do ponto de vista prático, se consideraram pouco fiáveis no seu processo de medição procurando assim obter um modelo final robusto e extremamente simples. Optou-se assim por agregar todos os tipos de acessos, independentemente da sua tipologia e por anulação as variáveis V_8 (existência de passeios) e V_{10} (número de semáforos de controlo velocidade), por se considerar que em Portugal, a sua implementação não segue critérios objectivos, aumentando assim a componente do erro aleatório. A agregação e eliminação destas variáveis traduziu-se complementarmente pela rejeição de outras que deixaram de se releva estatisticamente significativas ao nível de confiança de 95%. O modelo final revelou-se extremamente simples, sem contudo perder significativamente em termos de qualidade do ajuste (Tabela 4). Saliente-se que a variável “nível médio/elevado de restrições laterais”, foi a que mais influência assumiu na estimativa do valor da V_s (maior valor de β e menor p -value).

Tabela 4: Modelos III - Resultados da modelação com as variáveis agregadas por sentido de circulação. Modelo final simplificado

MODELO	MODELO III.A		MODELO III.B		MODELO III.C		MODELO III.D	
OBSERVADOR	A		B		C		D	
Coef. de Determinação	$R^2=0,6015$		$R^2=0,5813$		$R^2=0,6269$		$R^2=0,4812$	
$R^2_{Ajust.}$	$R^2=0,5979$		$R^2=0,5804$		$R^2=0,6245$		$R^2=0,4799$	
Coef. Independente	A = 85,82		A = 83,56		A = 89,44		A = 82,15	
Coef. de Regressão	B	β	B	β	B	β	B	β
V1 – Número de cruzamentos	-3,52	-0,21	-3,26	-0,18	-2,20	-0,16	-3,94	-0,27
V2 – Número de acessos Motorizados	-0,83	-0,24	-0,64	-0,17	-0,79	-0,28	-0,69	-0,23
V8 – Atravessamentos Pedonais	-2,35	-0,10			-0,12	-2,35	-1,97	-0,10
V13 – Nível Médio a Elevado de Restrições Laterais	-8,50	-0,44	-10,64	-0,52	-0,44	-7,00	-5,06	-0,31

3.3. Avaliação da qualidade do ajuste

A análise dos resíduos relativa aos diferentes modelos desenvolvidos, mostrou que de forma geral, a sua distribuição segue de perto a distribuição normal, não tendo sido detectada uma forma padrão muito evidente na análise individualizada entre os valores dos resíduos e os valores das variáveis independentes. Também a análise da colineariedade entre as variáveis independentes mostrou que as correlações encontradas não são muito significativas (inferiores a 0,8 normalmente considerado como valor limite).

Optou-se complementarmente por avaliar a qualidade do ajuste dos resultados estimados aos observados nos diferentes itinerários. Veja-se a título de exemplo a Figura 4 a qual representa essa comparação para dois dos especialistas (A e B) quando aplicados os modelos II (tabela 3). Considera-se que os valores estimados seguem de muito perto os valores resultantes do julgamento dos especialistas, sendo os afastamentos máximos obtidos pontualmente. Sublinhe-se o km 1+400 onde o modelo consistentemente aponta para 30km/h, em ambos os sentidos de circulação, ao mesmo tempo que os dois especialistas apontaram para o valor mínimo estabelecido na análise – 50km/h.

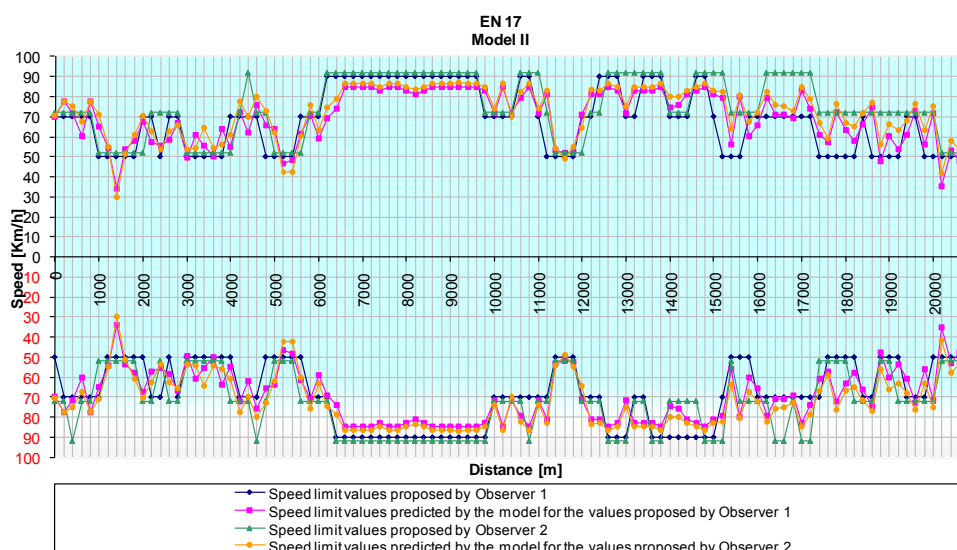


Figura 4: Comparação entre velocidades apontadas por dois dos especialistas e velocidades correspondentes velocidades seguras estimadas

4. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

A rede secundária de estradas, pelo facto de envolver uma grande variabilidade de ambientes rodoviários evidencia a necessidade de se estabelecerem critérios lógicos ou ferramentas de cálculo que suportem a definição dos limites de velocidade máxima. Este trabalho, apresentou o desenvolvimento de modelos matemáticos, onde a velocidade segura é estimada tendo em consideração as condicionantes locais que tendem a condicionar o comportamento dos condutores. Mais do que o desenvolvimento de um modelo validado, o trabalho procurou definir uma metodologia de trabalho capaz de produzir um modelo robusto para apoio à definição da velocidade segura, tendo por base um conjunto limitado de variáveis caracterizadoras da estrada e do ambiente rodoviário envolvente.

Os resultados obtidos mostraram-se bastante consistentes, quer entre os diferentes especialistas quer ao longo do processo de simplificação do modelo evidenciando a importância associada às variáveis representativas das “restrições laterais” à via (proximidade ou afastamento edificações ou outro tipo de ocupações) e do número de intersecções e de acessos à faixa de rodagem.

Os resultados obtidos, apesar de promissores evidenciam algumas fragilidades metodológicas que importa ultrapassar e que devem justificar o desenvolvimento de investigação complementar futura, designadamente assente na procura de outras técnicas de modelação alternativas. De facto, a aplicação de técnicas de regressão múltipla resulta no desenvolvimento de modelos contínuos enquanto que a selecção da velocidade segura se apresenta como um processo de escolha discreta. Nessa óptica perspectiva-se que a aplicação de modelos discretos assentes na avaliação da utilidade associada a cada uma das alternativas, se possa revelar uma técnica de modelação robusta. Por outro lado, o facto da modelação atribuir uma importância relevante associada às restrições laterais (variável qualitativa cujo processo de avaliação introduz subjectividade ao modelo), leva a que se deva procurar substituir desta variável por outra(s) quantitaiva(s), de modo a eliminar qualquer grau de subjectividade no seu registo.

Importa contudo enfatizar que a metodologia proposta deve ser tomada apenas como uma referência de base, já que a decisão final sobre qual a velocidade máxima a adoptar pode depender de outros fatores locais relevantes e que não são considerados neste modelo, designadamente o histórico de acidentes, presença de escola, etc. Também a procura de uma metodologia que permita aferir a velocidade ao longo do itinerário justifica trabalhos futuros.

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

Agradecimentos

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSR (2010) *Relatório de Sinistralidade 2010*, <http://www.ansr.pt/>
- Austroroads (2005) *Balance Between Harm Reduction and Mobility in Setting Speed Limits: A Feasibility Study*, Austroroads, Inc.
- Cardoso J. P. L. (1996) *Estudo das relações entre as Características da Estrada, a Velocidade e os Acidentes Rodoviários*. Aplicação a estrada de duas vias e dois sentidos – Tese PhD, IST, Lisboa, Maio
- DfT (2006) *Setting Local Speed Limits* - DfT Circular 01/2006, August, Pub: Department for Transport, UK 2006.
- Donald, D. (1994) Using Expert System Technology to Set Appropriate, Consistent Speed Limits—The Australian Experience. In Proc., *Third International Conference on Safety and the Environment in the 21st Century: Lessons from the Past, Shaping the Future*, Tel Aviv, Israel 1994.
- Fitzpatrick, K. Krammes, R.A., Fambro, D.B. (1997) Design Speed, Operating Speed and Posted Speed Relationships. *ITE Journal*, Vol. 67, No.2
- Fitzpatrick, K. et al (2003) *Design speed, operating speed, and posted speed practices*, Report 504, Part 1, National Cooperative Highway Research Program, National Research Council (U.S.). Transportation Research Board
- Correia G. H.A.; Bastos Silva, A. M. C – Setting Speed Limits in Rural Two-lane Highways by Modelling the Relationship Between Expert Judgment and Measurable Road-side, *Journal of Transportation Engineering from the ASCE* – Vol.137, No.3, March 2011
- Greibe, P., Nilsson, P.K., Herrstedt, L. (1999) *Speed Management in Urban Areas, A framework for the planning and evaluation process*, Report no. 168, The Danish Road Directorate
- Mackey, P. (2004) Context-sensitive design for rural speed management - *Congrès Annuel de 2004 de l'Association des Transports du Canada*, Quebec-Canada
- Neuman, T. et. al. (2002) *A Guide to Best Practices for Achieving Context Sensitive Solutions* - NCHRP Report 480, TRB
- TRB (2008) *Managing Speed – Review of Current Practice for Setting and Enforcing Speed Limits*, Especial Report 254: Transportation Research Board, National Academy Press. Washington DC, 1998, 427p.
- Stamatiadis, N. (2001) A European Approach to Context Sensitive Design -*Transportation Quarterly*, V.55, N.4, pp 41-48
- Stuster, J.; Coffman (1998) *Synthesis of Safety Research Related to Speed and Speed Management*; Pub: FHWA-RD-98-154, July, FHWA
- TRB (2011) *Speed Reduction Techniques for Rural High-to-Low Speed Transitions - A Synthesis of Highway Practice*, Synthesis 412. WASHINGTON, D.C.