

Raul Tomaz de Almeida

Homogeneidade do traçado de estradas interurbanas

Tese de Mestrado

Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação

Professor Doutor António Luís Pimentel Vasconcelos

Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva



RESUMO

O conceito de velocidade base é adotado na generalidade das normas de projeto para definir parâmetros mínimos de traçado. Verifica-se, no que respeita à segurança de curvas em planta, que este conceito não assegura um traçado que respeite as expectativas naturais dos condutores, revelando-se simultaneamente inadequado e excessivamente restritivo. O conceito de homogeneidade de traçado foi definido como forma de prevenir quer mudanças abruptas nas características geométricas de elementos rodoviários contíguos quer o uso de combinações de elementos que não respeitem as expectativas dos condutores. A norma de traçado em vigor propõe um método de avaliação da homogeneidade de traçado muito simplista com base no cálculo de um diagrama de velocidades específicas que apesar de designado como tal é um diagrama misto, *i.e.*, utiliza para as curvas circulares velocidades específicas que são determinadas por critérios de segurança e utiliza para os alinhamentos retos a velocidade do tráfego como representativa da velocidade específica. Por sua vez, a revisão da norma de traçado do InIR recomenda um método de avaliação da homogeneidade do traçado de estradas interurbanas de faixa única que remete para a utilização do programa “PERVEL”, desenvolvido pelo LNEC. Contudo, é uma metodologia que engloba várias hipóteses de cálculo e que sem recurso ao referido programa resulta num processo moroso e complexo. Assim, esta dissertação tem como objetivo contribuir para o desenvolvimento de um novo método de previsão de perfis de velocidades e de avaliação da homogeneidade do traçado.

Numa fase inicial é efetuada uma revisão da literatura nacional e internacional sobre métodos de avaliação da homogeneidade do traçado, em estradas de duas vias e dois sentidos, com faixa de rodagem única, vulgarmente designadas por estradas rurais de duas vias, complementando-os, sempre que necessário, com conceitos e limites normativos fundamentais para o seu cálculo. Verifica-se que, na maioria dos casos, é assumido que a velocidade em curva é constante e que os valores da aceleração e da desaceleração são baseados em valores uniformes que correspondem, no caso da aceleração, a uma ligeira pressão no acelerador, e no caso da desaceleração, à quase não aplicação dos travões.

Numa segunda fase, procedeu-se à recolha e tratamento de dados de tráfego que permitiram caracterizar a dinâmica de condução de um conjunto de condutores em estradas interurbanas, recorrendo a um veículo instrumentado provido de um sistema combinado de recolha de dados cinemáticos e registos de imagens de vídeo. A recolha de dados foi efetuada numa estrada interurbana nas proximidades da cidade de Viseu, que suportou o desenvolvimento de um novo modelo de estimação da velocidade operacional, assim como um modelo de aceleração e de desaceleração, verificando-se que a curvatura horizontal exerce uma influência primordial nas velocidades praticadas pelos condutores. O pressuposto de que a velocidade em curva é constante na totalidade da sua extensão não foi observado, muito pelo contrário, metade da distância ao longo da qual se efetua a variação da velocidade ocorre, em média, no interior do elemento curvo.

Com base nos dados de campo obtidos, desenvolveu-se e validou-se um método de previsão de perfis de velocidades e de avaliação da homogeneidade do traçado. Este método foi desenvolvido com base no modelo de *car-following* de Gipps, sendo alguns parâmetros estimados através de um processo de otimização, assente num algoritmo genético. Conclui-se que este modelo microscópico de simulação replica satisfatoriamente o comportamento dos vários condutores e que o indicador de homogeneidade é uma ferramenta útil para avaliar a segurança de elementos contíguos do traçado, assim como um indicador global dessa mesma homogeneidade.

Por fim, tendo por base os vários métodos de avaliação da homogeneidade do traçado que foram retirados da bibliografia nacional e estrangeira, assim como o novo método proposto, é efetuada uma análise comparativa, aplicada a um traçado fictício que integra trechos de estrada com traçado homogéneo e outros com traçado heterogéneo. Confirmou-se, para as situações analisadas, a robustez associada ao indicador de homogeneidade que pode ser utilizado individualmente ou em complemento aos vários métodos existentes.

Palavras-chave: Homogeneidade do traçado, Diagrama de velocidades, Indicadores de consistência, Segurança, Velocidade, Aceleração, Desaceleração, Gipps, Estradas interurbanas

ABSTRACT

The concept of design speed is assumed in most manuals to define minimum geometric design parameters. It is noticed, concerning the safety of horizontal curves, that this concept does not ensure a design that conforms to the natural expectations of the drivers, revealing itself simultaneously inadequate and overly limitative. The concept of geometric design consistency was defined as a way to prevent sudden changes on geometrical features of contiguous road elements and the use of combinations of elements that do not comply with the expectations of the drivers. The present Portuguese design manual proposes a method to evaluate the geometric design consistency that is too simplistic based on the estimate of an 85th percentile speed profile that in spite of that designation it is a mixed speed profile, *i.e.*, it uses for the horizontal curves operating speeds that are determined by safety criteria and it uses for the tangents a theoretical 85th percentile speed as representative of the operating speed. On the other hand, the revision of the design manual by InIR recommends a method to evaluate geometric design consistency of two-lane rural highways that refers to the use of the software “PERVEL”, developed by LNEC. However, it is a methodology that comprises various calculation assumptions and without the use of the said program results in a slow and complex procedure. Thus, this dissertation contributes to the development of a new method to predict operating speed profiles and to evaluate the geometric design consistency.

In an early stage it is performed a review of the Portuguese and international literature concerning methods to evaluate the geometric design consistency of two-lane rural highways and complemented, whenever necessary, with notions and regulatory limits that are essential for its estimation. In most cases, it is assumed that the speed on the curve is uniform and the values of the acceleration and deceleration are based on constant values that relate, concerning the acceleration, to a slight pressure on the accelerator pedal, and in the case of deceleration, to hardly any brake solicitation.

In a second stage, it was carried out the gathering and processing of data that allowed to differentiate the driving dynamics of a set of drivers on two-lane rural highways, using an instrumented vehicle provided with a combined system of kinematic data collecting and video footage recording. The data collecting was performed on a two-lane rural highway nearby the city of Viseu, and supported the development of a new model to estimate operating speed, as well as a model to estimate the acceleration and the deceleration, clarifying that the horizontal curvature plays a major influence on the operating speeds adopted by the drivers. The assumption that the speed on the curved section is uniform was not observed, quite the opposite, half of the distance where the speed differential is observed occurs, on average, within the curved section.

Based on the field data collected, it is developed and validated a model to predict operating speed profiles and for geometric design consistency evaluation. This method was developed based on the car-following model by Gipps, and some parameters were estimated centered on

an optimization process, based on a genetic algorithm. It was concluded that this microscopic simulation model replicates satisfactorily the behavior of several drivers and that the presented consistency index is a promising innovative tool that can be used as a surrogate measure to estimate the safety of contiguous elements of a road segment, as well as a global indicator of geometric design consistency.

Lastly, based on the various methods for geometric design consistency evaluation retrieved from the Portuguese and foreign literature, as well as the presented method, it is performed a comparative analysis, applied to a fictitious road design that composes road segments with both poor and strong geometric design consistency. It was confirmed, concerning the analyzed scenarios, the robustness associated to the consistency index that can be used as standalone or to complement the existing methods of road safety evaluation.

Keywords: Design consistency, Speed profiles, Consistency models, Road safety, Two-lane rural highways, Operating speed, Acceleration, Deceleration, Gipps

AGRADECIMENTOS

A todos os que contribuíram para a realização deste trabalho, família, amigos e colegas, quero manifestar os meus mais sinceros e profundos agradecimentos. Esta dissertação não teria sido possível sem o vosso contributo.

Aos meus mentores, Prof. Doutor Luís Vasconcelos e Prof.^a Doutora Ana Bastos Silva, pelos conhecimentos e experiências partilhadas, pelas valiosas contribuições ao longo deste trabalho, pela paciência e total disponibilidade, mesmo naqueles períodos tardios, pela orientação e acompanhamento daquela que foi a etapa mais desafiante do meu percurso académico e, principalmente, pela amizade conquistada.

Aos meus professores de mestrado, pela experiência, conselhos e dedicação, que contribuíram da melhor forma para aprofundar o meu conhecimento. Acima de tudo, o meu especial agradecimento ao Prof. Doutor Luís Vasconcelos por me continuar a acompanhar neste percurso e por ter despertado desde logo o meu interesse pelo conhecimento e pela vida académica. A todos, obrigado pela oportunidade de aprender.

Quero agradecer ainda aos meus orientadores e à organização do GET pela oportunidade de apresentar este trabalho em sessão de póster no 13.º Encontro do Grupo de Estudos em Transportes que se realizou nos dias 4 e 5 de janeiro de 2016 na Figueira da Foz.

Gostaria de agradecer também ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra pela disponibilização do equipamento utilizado na fase de recolha de dados.

Aos meus colegas e amigos, João Silva, Tiago Carreira, Tiago Costa, e muitos outros, pela amizade, coragem e apoio, desde a fase de investigação até à revisão final da dissertação, nos momentos sérios e nos mais divertidos, vocês estavam lá.

Não podia deixar de agradecer à minha família, especialmente aos meus pais e à minha avó, pelo carinho e apoio incondicional.

À Sara, por tudo. Acredita, sem ti isto não seria *mesmo* possível.

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento	1
1.2	Metodologias de avaliação da homogeneidade do traçado	2
1.2.1	<i>Modelos de estimação da velocidade em elementos do traçado</i>	<i>3</i>
1.2.2	<i>Indicadores de consistência do traçado</i>	<i>4</i>
1.3	Objetivos e metodologia geral	6
1.4	Estrutura da dissertação	7
2	HOMOGENEIDADE DO TRAÇADO E CONCEITOS FUNDAMENTAIS	9
2.1	Introdução	9
2.2	Distinção entre homogeneidade e consistência	10
2.3	Conceitos fundamentais de velocidade	11
2.3.1	<i>Introdução</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Velocidade base ou velocidade de projeto</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Velocidade específica, velocidade não impedida e velocidade operacional</i>	<i>11</i>
2.3.4	<i>Velocidade do tráfego</i>	<i>12</i>
2.3.5	<i>Velocidade média e velocidade de operação</i>	<i>13</i>
2.4	Conceitos fundamentais do traçado em planta	14
2.4.1	<i>Alinhamentos retos e curvas circulares</i>	<i>14</i>
2.4.2	<i>Raios mínimos das curvas circulares</i>	<i>16</i>
2.4.3	<i>Curvas de transição</i>	<i>19</i>
3	METODOLOGIAS EXISTENTES DE AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DO TRAÇADO	21
3.1	Introdução	21
3.2	Método da Junta Autónoma de Estradas	22
3.2.1	<i>Introdução</i>	<i>22</i>
3.2.2	<i>Princípios básicos</i>	<i>22</i>
3.2.3	<i>Descrição geral do procedimento de cálculo</i>	<i>23</i>
3.2.4	<i>Estimação da velocidade específica em curvas circulares</i>	<i>23</i>
3.2.5	<i>Distância de transição e distância de visibilidade de decisão</i>	<i>26</i>
3.2.6	<i>Cálculo do diagrama de velocidades específicas</i>	<i>27</i>
3.2.7	<i>Considerações finais</i>	<i>33</i>
3.3	Método do Instituto de Infraestruturas Rodoviárias	34
3.3.1	<i>Introdução</i>	<i>34</i>
3.3.2	<i>Princípios básicos</i>	<i>34</i>
3.3.3	<i>Descrição geral do procedimento de cálculo</i>	<i>35</i>
3.3.4	<i>Divisão da estrada em elementos retos e curvos</i>	<i>36</i>
3.3.5	<i>Estimação da velocidade média de circulação livre (elementos retos)</i>	<i>36</i>
3.3.6	<i>Estimação da velocidade de circulação não impedida (elementos curvos)</i>	<i>37</i>
3.3.7	<i>Limites máximos da velocidade de circulação não impedida</i>	<i>38</i>
3.3.8	<i>Cálculo do diagrama de velocidades médias de circulação não impedida</i>	<i>38</i>
3.3.9	<i>Cálculo do valor da desaceleração na aproximação a uma curva</i>	<i>42</i>

3.3.10	<i>Considerações finais</i>	43
3.4	Método desenvolvido no âmbito do projeto SAFESPEED.....	43
3.4.1	<i>Introdução</i>	43
3.4.2	<i>Descrição do modelo e princípios básicos</i>	44
3.4.3	<i>Equação para a estimação da velocidade livre de circulação</i>	45
3.4.4	<i>Considerações finais</i>	45
3.5	Método do Highway Engineering Research Group	46
3.5.1	<i>Introdução</i>	46
3.5.2	<i>Descrição do modelo e princípios básicos</i>	46
3.5.3	<i>Equações para a estimação da velocidade operacional em curvas</i>	48
3.5.4	<i>Equação para a estimação da velocidade operacional em retas</i>	48
3.5.5	<i>Equações para o cálculo da desaceleração e aceleração</i>	49
3.5.6	<i>Indicador da consistência do traçado</i>	49
3.5.7	<i>Considerações finais</i>	50
3.6	Outros modelos existentes na literatura.....	50
3.7	Limitações dos modelos de estimação de velocidade existentes	51
4	RECOLHA E TRATAMENTO DOS DADOS DE CAMPO	53
4.1	Introdução.....	53
4.2	Metodologias usadas em outros estudos	54
4.3	Metodologia adotada para a recolha dos dados.....	55
4.3.1	<i>Introdução</i>	55
4.3.2	<i>Equipamento usado para a recolha de dados</i>	56
4.3.3	<i>Procedimento usado para a recolha de dados</i>	57
4.4	Tratamento dos dados.....	59
4.4.1	<i>Descrição da metodologia e princípios básicos</i>	59
4.4.2	<i>Procedimento usado para a modelação do traçado</i>	60
4.4.3	<i>Análise da variação da velocidade na transição entre elementos</i>	62
4.5	Considerações finais.....	63
5	DESENVOLVIMENTO DE UMA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DO TRAÇADO	65
5.1	Enquadramento.....	65
5.2	Dados de base.....	66
5.3	Modelo de estimação da velocidade operacional em curvas.....	67
5.3.1	<i>Introdução</i>	67
5.3.2	<i>Análise preliminar do modelo de estimação da velocidade</i>	68
5.3.3	<i>Modelo proposto para a estimação da velocidade em curvas</i>	68
5.4	Modelos de estimação da desaceleração e aceleração.....	69
5.4.1	<i>Introdução</i>	69
5.4.2	<i>Análise preliminar e modelo proposto para a estimação da desaceleração</i>	72
5.4.3	<i>Análise preliminar e modelo proposto para a estimação da aceleração</i>	73
5.5	Modelo de previsão de perfis de velocidades.....	75
5.5.1	<i>Introdução</i>	75
5.5.2	<i>O modelo de car-following de Gipps</i>	76
5.5.3	<i>Modelo adaptado baseado no modelo de Gipps</i>	77

5.6	Indicador de homogeneidade do traçado	85
5.7	Considerações finais	90
6	ANÁLISE COMPARATIVA DE AVALIAÇÃO DA HOMOGENEIDADE DO TRAÇADO	91
6.1	Introdução	91
6.2	Avaliação da homogeneidade de um traçado.....	92
6.2.1	<i>Descrição e características geométricas do traçado</i>	92
6.2.2	<i>Cálculo dos diagramas de velocidades do trecho homogéneo</i>	92
6.2.3	<i>Indicadores de homogeneidade aplicados ao trecho homogéneo</i>	95
6.2.4	<i>Aplicação do método proposto ao traçado</i>	99
6.3	Considerações finais	100
7	CONCLUSÕES GERAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	103
7.1	Síntese e conclusões gerais	103
7.2	Desenvolvimentos futuros	106
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICES	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Combinação de raios desejável: 1) relação muito boa; 2) relação boa; 3) relação aceitável (adaptado de JAE, 1994)	14
Figura 3.1 – Análise de regressão não-linear utilizando os valores do Quadro 3.1	24
Figura 3.2 – Início das zonas de aceleração e fim das zonas de desaceleração: a) zona de aproximação à curva; b) zona de saída da curva; c) zona de transição entre duas curvas (adaptado de JAE, 1994)	28
Figura 3.3 – Distâncias de transição (aceleração e desaceleração): a) zona de aproximação à curva; b) zona de saída da curva; c) zona de transição entre duas curvas (adaptado de JAE, 1994).....	28
Figura 3.4 – Exemplo do traçado em planta de um trecho de estrada (adaptado de JAE, 1994)	29
Figura 3.5 – Primeira fase da construção do diagrama de velocidades específicas	30
Figura 3.6 – Segunda fase da construção do diagrama de velocidades específicas	31
Figura 3.7 – Última fase da construção do diagrama de velocidades específicas (adaptado de JAE, 1994).....	31
Figura 3.8 – Velocidade média de circulação não impedida teórica (V_{tk}) (adaptado de InIR, 2010).....	39
Figura 3.9 – Variação da velocidade média de circulação livre num elemento reto (k) (adaptado de InIR, 2010).....	40
Figura 3.10 – Variação da velocidade média de circulação livre num elemento reto (k) cujo comprimento não é compatível com a desaceleração normal (adaptado de InIR, 2010)	41
Figura 4.1 – Equipamento de recolha de dados instalado no veículo: a) aparelho primário modelo DL1 MK3 e câmara de vídeo de alta resolução; b) aparelho secundário modelo VIDEO4 para gravação de vídeo.....	56
Figura 4.2 – EN 231: a) secção próxima de Viseu com uma sequência de várias curvas e retas; b) travessia do rio Dão; c) secção próxima da localidade de Santar com uma sequência de várias curvas acentuadas; d) secção próxima da localidade de Vilar Seco com uma sequência de retas extensas (adaptado de Google Maps, 2015)	57
Figura 4.3 – Diagrama de curvatura parcial do trecho 1 no sentido Viseu-Nelas: (+) curva à direita; (-) curva à esquerda	60
Figura 4.4 – Programa de análise de dados (RT Analysis v8.5): a) trajeto efetuado assinalado no mapa de satélite; b) diagrama de velocidades de acordo com a distância percorrida; c) janela de visualização do vídeo; d) valores de vários parâmetros (velocidade, distância, <i>etc.</i>) no instante selecionado.....	61
Figura 4.5 – Modelação do traçado no AutoCAD Civil 3D: a) segmento de estrada designado de trecho 1; b) segmento de estrada designado de trecho 2.....	61
Figura 4.6 – Diagrama parcial de curvatura e perfil de velocidades individual.....	63
Figura 5.1 – Modelo proposto de estimação da velocidade operacional em curvas	69
Figura 5.2 – Diagrama parcial representativo do cálculo da desaceleração e da aceleração ..	71
Figura 5.3 – Modelo proposto de estimação da desaceleração na aproximação à curva	72
Figura 5.4 – Modelo proposto de estimação da aceleração na saída da curva	74
Figura 5.5 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Viseu-Nelas para os quatro condutores: observações vs. simulação, secção [5; 9] km.....	82

Figura 5.6 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Nelas-Viseu para o Condutor A: observações vs. simulação, secção [0; 5] km.....	83
Figura 5.7 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Nelas-Viseu para o Condutor B: observações vs. simulação, secção [0; 5] km	84
Figura 5.8 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Nelas-Viseu para o Condutor C: observações vs. simulação, secção [0; 5] km	84
Figura 5.9 – Indicador de homogeneidade para o Condutor A, secção [3; 6] km	86
Figura 5.10 – Indicador de homogeneidade para o Condutor B, secção [3; 6] km	87
Figura 5.11 – Indicador de homogeneidade para o Condutor C, secção [3; 6] km	87
Figura 5.12 – Indicador de homogeneidade para o Condutor D, secção [3; 6] km	88
Figura 5.13 – Relação entre o indicador de homogeneidade dos vários condutores: a) Condutor A; b) Condutor B; c) Condutor C; d) Condutor D.....	88
Figura 6.1 – Diagrama de velocidades para o método da JAE (1994)	93
Figura 6.2 – Diagrama de velocidades para o método de Lobo <i>et al.</i> (2013).....	93
Figura 6.3 – Diagrama de velocidades para o método do InIR (2010).....	94
Figura 6.4 – Diagrama de velocidades para o método do HERG (Camacho-Torregrosa <i>et al.</i> , 2013)	95
Figura 6.5 – Método proposto aplicado ao trecho homogéneo.....	99
Figura 6.6 – Método proposto aplicado ao trecho heterogéneo.....	100

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Conceitos de velocidade de circulação não impedida (InIR, 2010).....	12
Quadro 2.2 – Velocidade do tráfego nas estradas nacionais (InIR, 2010; JAE, 1994).....	13
Quadro 2.3 – Análise dos raios entre curvas sucessivas (Moreira, 2000).....	15
Quadro 2.4 – Raios mínimos em função dos alinhamentos retos (JAE, 1994).....	15
Quadro 2.5 – Extensão mínima dos alinhamentos retos e raio mínimo normal (InIR, 2010; JAE, 1994).....	16
Quadro 2.6 – Raios mínimos absolutos pela equação (2.1) e pela norma (JAE, 1994), e aceleração centrípeta para cada raio mínimo absoluto (adaptado de Branco <i>et al.</i> , 2001).....	17
Quadro 2.7 – Raios mínimos absolutos pela equação (2.1) e pela revisão da norma (InIR, 2010), e aceleração centrípeta para cada raio mínimo absoluto.....	18
Quadro 2.8 – Raios mínimos normais pela equação (2.2) e pela norma (JAE, 1994), e aceleração centrípeta para cada raio mínimo normal (adaptado de Branco <i>et al.</i> , 2001).....	19
Quadro 2.9 – Raios mínimos sem sobre-elevação em função da velocidade base (InIR, 2010; JAE, 1994).....	20
Quadro 3.1 – Raios mínimos absolutos em planta calculados pela equação (2.1).....	24
Quadro 3.2 – Velocidade específica em curvas calculada pela equação (3.1) e pela norma (JAE, 1994) para estradas com duas vias.....	25
Quadro 3.3 – Distâncias de transição para o exemplo da Figura 3.4.....	30
Quadro 4.1 – Características do troço de estrada e número de registos nos dois sentidos de trânsito.....	58
Quadro 5.1 – Exemplo dos dados para o cálculo da desaceleração (apenas são apresentados os dados de um condutor no trecho 1, no sentido Viseu-Nelas).....	71
Quadro 5.2 – Valores da aceleração médios em função do raio.....	75
Quadro 5.3 – Análise de parâmetros para os quatro condutores em diferentes sentidos de trânsito.....	80
Quadro 5.4 – Parâmetros finais ótimos para os quatro condutores.....	81
Quadro 5.5 – Indicador de homogeneidade global do traçado.....	89
Quadro 6.1 – Características geométricas do traçado fictício homogéneo.....	92
Quadro 6.2 – Limites de consistência do traçado (m/s) (adaptado de Polus e Mattar-Habib, 2004).....	97
Quadro 6.3 – Resultados dos indicadores de homogeneidade do traçado.....	97
Quadro 6.4 – Limites para determinar a qualidade da consistência do traçado, critérios I e II de Lamm (adaptado de Lamm <i>et al.</i> , 1999).....	98
Quadro 6.5 – Resultados dos critérios I e II de Lamm aplicados ao traçado.....	98

SIMBOLOGIA

Letras romanas

a, a_{85}	aceleração (m/s^2)
a_c	aceleração centrípeta (m/s^2)
a_i	aceleração individual de cada condutor (m/s^2) área delimitada pelo perfil da velocidade operacional e a linha da velocidade operacional média (m^2/s)
a_n	aceleração máxima do seguidor (m/s^2)
A	parâmetro da clotóide (m)
A, B	parâmetros de calibração no modelo de Polus e Mattar-Habib
AC	ângulo ao centro ($^\circ$)
AR	raio médio (<i>average radius</i>) (m)
ATS	velocidade média de circulação (<i>average travel speed</i>) (km/h)
$BFFS$	velocidade livre de circulação de referência (<i>base free-flow speed</i>) (km/h)
C	variável <i>dummy</i> para curvas índice de consistência do traçado (m/s, km/h)
CCR	taxa de variação da curvatura (<i>curvature change rate</i>) ($^\circ/km$)
CRR	relação entre o raio de uma curva circular e o raio médio (<i>curve radius to average radius</i>)
d	quilometragem da secção em consideração (m) desaceleração (m/s^2)
d_0	quilometragem da secção de início do elemento reto (m)
d_1	quilometragem da secção de início da diminuição de velocidade (m)
d_{85}	desaceleração (m/s^2)
d_i	desaceleração individual de cada condutor (m/s^2)
d_{n-1}	desaceleração máxima no modelo de Gipps ($d_{n-1} > 0$) (m/s^2)
d'_{n-1}	estimativa que o condutor seguidor faz da desaceleração máxima do veículo líder ($d'_{n-1} > 0$) (m/s^2)
dt	intervalo de simulação (s)
D	distância entre os pontos de início e fim da desaceleração (ou aceleração) (m)
D_1	distância à origem do ponto de início da desaceleração (ou aceleração) (m)
D_2	distância à origem do ponto final da desaceleração (ou aceleração) (m)
DC	grau de curvatura (<i>degree of curvature</i>) ($^\circ/100$ m de arco)

DD	distância de visibilidade de decisão (m)
D_f	distância à origem do ponto final de um elemento (reto ou curvo) (m)
D_i	distância à origem do ponto de início de um elemento (reto ou curvo) (m)
DI	densidade de interseções ($DI > 0$) (n.º/km)
DLA	desobstrução lateral adicional ($DLA > 0$) (m)
DT	distância de transição (m)
e_t	erro de previsão no período t
E	extensão do elemento no modelo de Lobo <i>et al.</i> (m)
$E_{a,10}, E_{a,20}$	medidas de dispersão da velocidade (m/s)
ECR	percentagem estimada de acidente (<i>estimated crash rate</i>)
f_A	parâmetro de ajustamento da <i>FFS</i> devido à densidade de pontos de interseção (km/h)
f_{LS}	parâmetro de ajustamento da <i>FFS</i> devido à largura da via e da berma (km/h)
f_R	coeficiente de atrito transversal assumido na curva
f_{RA}	coeficiente de atrito transversal exigido pelo veículo
F_{des}	posição relativa do ponto final da desaceleração ao ponto médio da curva
FFS	velocidade livre de circulação (<i>free-flow speed</i>) (km/h)
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
G	inclinação longitudinal (<i>grade</i>) (%)
GM	medida geométrica (<i>geometric measure</i>)
GM_L, GM_S	medidas geométricas de uma secção reta (m ² , m)
H	índice de homogeneidade global do traçado
L	extensão do troço de estrada (m) extensão do elemento (m)
L_1	zona de aumento de velocidade (aceleração) (m)
L_2	zona de velocidade constante (m)
L_3	zona de diminuição de velocidade (desaceleração) (m)
L_B	largura da berma (m)
L_C	extensão do elemento curvo (m, km)
L_d	distância de desaceleração (m)
L_{des}	extensão da desaceleração em curva (m)

L_F	largura da faixa de rodagem (m)
$L_{\text{mín}}$	extensão mínima do elemento reto necessária para efetuar uma travagem normal (m) extensão mínima dos alinhamentos retos (m)
L_{n-1}	comprimento real do veículo líder (m)
L_P	largura pavimentada (m)
L_V	largura da via (m)
MSE	erro quadrático médio (<i>mean squared error</i>)
n	número de elementos geométricos número de períodos
r	coeficiente de correlação linear de Pearson ($-1 < r < 1$)
R	raio da curva circular (m)
R_1	raio da curva circular que antecede o alinhamento reto (m)
R_2	raio da curva circular que sucede o alinhamento reto (m)
R^2	coeficiente de determinação ($0 < R^2 < 1$)
$R^{-1}, 1/R$	curvatura (m^{-1})
R_a	medida de consistência (m/s)
RA	raio mínimo absoluto (m)
$R_{\text{máxcseg}}$	raio máximo da curva seguinte (m)
$R_{\text{míncseg}}$	raio mínimo da curva seguinte (m)
$RMSE$	raiz quadrada do erro quadrático médio (<i>root mean squared error</i>)
RN	raio mínimo normal (m)
R_{PC}	raio da curva anterior ao início da reta (m)
RR	relação entre os raios máximo e mínimo (<i>ratio of the maximum and minimum curve radii</i>)
RS	raio mínimo sem sobre-elevação (m)
s	distância percorrida (m)
s_{n-1}	espaçamento mínimo entre dois veículos imobilizados (m)
S	sinuosidade média do troço a montante ($S > 0$) ($^{\circ}/\text{km}$)
S_{n-1}	comprimento efetivo do veículo líder ($S = L + s$) (m)
SE	sobre-elevação
SF	fator de sensibilidade (<i>sensitivity factor</i>) ($SF \geq 1$)

TL	extensão da reta (<i>tangent length</i>) (m)
v	velocidade final (m/s)
\bar{v}_{85}	velocidade operacional média (km/h)
$v_n(t)$	velocidade do veículo seguidor no instante t (m/s)
$v_{n-1}(t)$	velocidade do veículo líder no instante t (m/s)
v_n^d	velocidade desejada do seguidor no modelo de Gipps (m/s)
v_n^A	velocidade dada pela componente de aceleração do modelo de Gipps (m/s)
v_n^B	velocidade dada pela componente de desaceleração do modelo de Gipps (m/s)
V	velocidade (m/s)
V_{85}	velocidade operacional (km/h)
V_{85i}	velocidade operacional no elemento “ i ” (km/h)
V_{85i+1}	velocidade operacional no elemento “ $i+1$ ” (km/h)
V_{85C}	velocidade operacional em curva (km/h)
V_{85MC}	velocidade operacional no ponto médio da curva (km/h)
V_{85T}	velocidade operacional em reta (km/h)
VB, V_d	velocidade base (km/h)
VC_{85}	velocidade não impedida em curva (km/h)
VC_i	velocidade individual no ponto final da desaceleração (ou no ponto de início da aceleração) na curva (m/s)
V_{des}	velocidade desejada (km/h)
VE	velocidade específica (km/h)
V_k	variação da velocidade média de circulação livre num elemento reto (km/h)
V_{k-1}	velocidade média de circulação não impedida no elemento anterior (km/h)
V_{k+1}	velocidade média de circulação não impedida no elemento seguinte (km/h)
VL	variável <i>dummy</i> para visibilidade limitada
V_M	velocidade média de circulação não impedida numa secção arbitrária do elemento reto (km/h)
V_{MC}	velocidade média de circulação não impedida em curva (km/h)
V_{MR}	velocidade média de circulação livre (em reta) (km/h)
V_{Ri}	velocidade individual no ponto de início da desaceleração (ou no ponto final da aceleração) na reta (m/s)

V_{tk}	velocidade média de circulação não impedida teórica (km/h)
V_T	velocidade na reta de aproximação à curva (km/h)
VT	velocidade do tráfego (km/h)
u	velocidade inicial (m/s)
$x_n(t)$	posição longitudinal do seguidor no instante t (m)
$x_{n-1}(t)$	posição longitudinal do líder no instante t (m)
X_e	características do elemento
X_j	características do troço a jusante
X_m	características do troço a montante

Letras gregas

$\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$	coeficientes de regressão no modelo de Lobo <i>et al.</i>
Δ	ângulo de deflexão ou ângulo de desvio (°)
$\Delta_{85}V$	diferencial das velocidades correspondentes ao percentil 85 (km/h)
Δf_R	diferença entre f_R e f_{RA}
ΔV_{85}	diferencial das velocidades operacionais (km/h)
$\overline{\Delta V}_{85}$	redução média da velocidade operacional (km/h)
θ	margem de segurança associada ao tempo de reação no modelo de Gipps
λ	parâmetro de calibração do <i>MSE</i>
μ	coeficiente de atrito transversal
σ, σ_{85}	desvio padrão das velocidades operacionais (km/h)
τ	tempo de reação (s)

Siglas e Acrónimos

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials (associação norte-americana de infraestruturas rodoviárias e transportes)
AG	algoritmo genético
AR	alinhamento reto
CC	curva circular
CT	curva de transição
EN	estrada nacional

EP	Estradas de Portugal
FGSV	Forschungsgesellschaft fuer Strassen- und Verkehrswesen (associação alemã de investigação rodoviária e transportes)
FHWA	Federal Highway Administration (agência governamental norte-americana de infraestruturas rodoviárias e transportes)
GPS	Global Positioning System (sistema de posicionamento global)
HCM	Highway Capacity Manual (manual norte-americano de projeto rodoviário)
HERG	Highway Engineering Research Group (núcleo de investigação em engenharia rodoviária da Universidade Politécnica de Valência)
HSM	Highway Safety Manual (manual norte-americano de segurança rodoviária)
IC	itinerário complementar
IEP	Instituto das Estradas de Portugal
IMT	Instituto da Mobilidade e dos Transportes
InIR	Instituto de Infraestruturas Rodoviárias
IP	itinerário principal Infraestruturas de Portugal
IHSDM	Interactive Highway Safety Design Model (modelo interativo de avaliação da homogeneidade e segurança do traçado em estradas norte-americanas desenvolvido pela FHWA em colaboração com a AASHTO e a TRB)
JAЕ	Junta Autónoma de Estradas
ln	logaritmo natural
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
REFER	Rede Ferroviária Nacional
SI	Sistema Internacional de unidades
TMDA	tráfego médio diário anual
TRB	Transportation Research Board (associação norte-americana de investigação em transportes)

1 Introdução

1.1 Enquadramento

O objetivo dos meios de transporte é normalmente estabelecido como a “deslocação segura e eficiente de bens e pessoas” (Homburger e Kell, 1989). No caso específico do transporte rodoviário este objetivo pressupõe a existência de um traçado que não defraude as expectativas naturais dos condutores. Desse modo, a velocidade é normalmente usada como um dos fatores mais relevantes para avaliar o desempenho de uma infraestrutura rodoviária (Lobo *et al.*, 2013). Nestas últimas décadas, a velocidade tem sido um dos principais focos de interesse para os investigadores nas áreas de projeto e de operação, resultando em inúmeros modelos de velocidade operacional aplicáveis em diversos países (TRB, 2011). A velocidade de projeto, ou velocidade base, é estabelecida de acordo com a funcionalidade pretendida para uma determinada estrada, constituindo o ponto de partida para a seleção da maioria das características geométricas que permitam a essa estrada corresponder às expectativas dos condutores em termos de tempo de viagem, economia e comodidade, e deverá ser consistente com as velocidades expectáveis pelos condutores nessa mesma estrada. No que respeita à fase de operação, a velocidade operacional, ou velocidade do tráfego, é também um forte indicador do desempenho da estrada, sendo normalmente calculada através do percentil 85 da distribuição de velocidades observadas em ambiente real (AASHTO, 2011). Do mesmo modo, o *Highway Capacity Manual* (HCM) (TRB, 2010) aponta a velocidade como o parâmetro mais adequado para uma análise económica e ambiental em estradas de duas vias. Assim, é importante definir traçados que não imponham variações significativas nas características geométricas de elementos consecutivos e por inerência variações bruscas ao comportamento do condutor. Esta é a premissa para garantir a homogeneidade do traçado. Portanto, a necessidade de prever o comportamento dos condutores nestas situações tem resultado em variadas metodologias de avaliação da qualidade do traçado de estradas interurbanas.

1.2 Metodologias de avaliação da homogeneidade do traçado

A verificação individualizada das velocidades nos diferentes elementos do traçado pode, em muitos casos, revelar-se excessivamente restritiva e inadequada para assegurar um traçado confortável e seguro. Existem assim diversos métodos para garantir um bom equilíbrio na sucessão de elementos (retos e curvos) e avaliação da homogeneidade dos traçados rodoviários, classificando-se em quatro grandes grupos: *i*) métodos que utilizam parâmetros de comportamento de tráfego (incluindo estatísticas da distribuição de velocidades ou diagramas da sua evolução ao longo da estrada); *ii*) métodos que utilizam índices relacionados com a geometria do traçado; *iii*) métodos que recorrem à “carga mental¹” da tarefa de condução; *iv*) métodos que usam listas de verificação do cumprimento de critérios de homogeneidade (Cardoso, 2004; Fitzpatrick *et al.*, 2000a; InIR, 2010). Ng e Sayed (2004) indicam ainda um outro método para avaliar a homogeneidade do traçado relativo à estabilidade do veículo.

Um traçado homogêneo obtém-se quando as variações da velocidade livre de circulação são controladas e se fazem de uma forma gradual ao longo da estrada. Com este objetivo em mente, é essencial dispor de adequados modelos de estimação da velocidade livre de circulação em função das características geométricas da estrada (Cardoso, 2004). Com estes modelos é possível definir critérios de homogeneidade do traçado atendendo nomeadamente ao estabelecimento de limites à variação diferencial de velocidades entre dois elementos consecutivos, como é preconizado na atual norma de traçado (JAE, 1994).

Entre as várias características que podem ser associadas à velocidade livre de circulação, algumas são mais significativas que outras, como é o caso da velocidade máxima legal, número de vias, tipologia da estrada, percentagem de veículos pesados, condições atmosféricas, visibilidade, período do dia, e características associadas ao comportamento do condutor (Ye *et al.*, 2001). No entanto, apesar de já existir um número significativo de estudos relativos à velocidade operacional, continua a justificar-se o desenvolvimento de trabalhos que permitam identificar os fatores que afetam a velocidade de circulação livre dos condutores, sobretudo no desenvolvimento de perfis contínuos de velocidades em estradas rurais de duas vias (Cafiso e Cerni, 2012).

Wooldridge *et al.* (2003) realizaram um estudo extensivo sobre a homogeneidade do traçado em estradas rurais de duas vias, com o objetivo de encontrar regras de consistência que possam ser usadas no IHSDM (Interactive Highway Safety Design Model), e recomendações para a introdução do conceito de homogeneidade do traçado no manual da AASHTO (2011), vulgarmente designado por *Green book* da AASHTO. Várias regras foram estudadas, como por exemplo, a influência da largura da faixa de rodagem e a largura das bermas. Estes elementos influenciam claramente a segurança numa estrada, e a sua variação defrauda a expectativa dos

¹ Carga mental – pode ser definida como parte dos recursos mentais que um operador tem de investir para executar uma tarefa. A carga mental de condução está relacionada com a frequência que um condutor tem de efetuar uma determinada atividade da tarefa de condução: aumenta com a redução do tempo disponível para executar as atividades de condução e com a complexidade e o caráter de novidade da situação de tráfego (InIR, 2010).

condutores. Um exemplo é o caso de curvas acentuadas que apresentam uma largura de berma superior ao elemento anterior. Esta situação transmite uma mensagem errada e inconsistente aos condutores, uma vez que em curvas acentuadas a velocidade deve ser reduzida e bermas largas estão associadas a velocidades elevadas.

1.2.1 Modelos de estimação da velocidade em elementos do traçado

Normalmente, os manuais de referência e as normas de traçado de diferentes países estabelecem a velocidade operacional em troços de estrada através de uma análise focada em elementos geométricos específicos do traçado. Nos Estados Unidos, a AASHTO (2011) propõe algumas recomendações no que toca às velocidades de projeto e operacional de acordo com a tipologia da estrada. Este procedimento é o mesmo que se verifica na *Norma de traçado* da JAE² (1994) relativamente às velocidades base e do tráfego. No mesmo enquadramento, a *Revisão da norma de traçado* do InIR (2010) mantém esta mesma relação entre as velocidades base e do tráfego mas, por outro lado, apresenta um modelo de estimação da velocidade do tráfego em estradas de duas vias e faixa de rodagem única considerando que esta velocidade é representada pela velocidade média de circulação não impedida. O HCM (TRB, 2010) indica uma velocidade em regime livre de “base” para estradas sem interceções e com largura de via e de berma superiores a 3,6 m e a 1,8 m, respetivamente, e propõe um modelo de estimação da velocidade livre de circulação (*free-flow speed*, FFS) de acordo com determinadas reduções aplicadas à FFS de “base”. Em países tais como a Alemanha (FGSV, 1995) (referido por TRB, 2011), e o Reino Unido (Highways Agency, 2002; Rogers, 2003), a velocidade operacional depende, no primeiro caso, da taxa de variação da curvatura (*curvature change rate*, CCR) e da largura pavimentada e, no segundo caso, da velocidade média de veículos ligeiros e da sinuosidade, entre outros (*e.g.*, largura da faixa de rodagem e distância de visibilidade).

De acordo com Lobo *et al.* (2013), a problemática da modelação de velocidades não se prende apenas com as entidades gestoras das infraestruturas rodoviárias, mas também com investigadores do mundo académico, resultando em modelos para diferentes elementos geométricos, tipos de veículos e condições ambientais. Estes estudos têm originado diversas metodologias de avaliação da homogeneidade e consistência do traçado. A geometria da diretriz tem sido apontada como o fator mais condicionante da velocidade e pode ser caracterizada por variados parâmetros, tais como o raio, o “grau de curvatura³” (*degree of curvature*, DC), a taxa de variação da curvatura, ou o ângulo de deflexão (também designado por ângulo de desvio). O modelo de Morrall e Talarico (1994), no seu estudo para determinar o atrito transversal em estradas rurais de duas vias, considera o “grau de curvatura” como a única característica que exerce um efeito relevante na velocidade. Passetti e Fambro (1999) investigaram o efeito das

² A JAE – Junta Autónoma de Estradas foi dissolvida em 1999 e substituída pelo então denominado IEP – Instituto das Estradas de Portugal. O IEP deixa entretanto de ser um instituto público e recebe a designação de EP – Estradas de Portugal. Em 2015 é determinada a extinção da empresa EP e esta é incorporada por fusão na REFER – Rede Ferroviária Nacional, passando a denominar-se IP – Infraestruturas de Portugal.

³ Este parâmetro não deve ser confundido com a curvatura, ou inverso do raio ($1/R$); no entanto, ao ser definido como um grau por 100 metros de arco é possível relacioná-lo com a curvatura ($DC = 5729,578/R$).

curvas de transição relativamente à velocidade praticada nas curvas, considerando no seu modelo apenas a curvatura ($1/R$) como característica relevante. O raio é considerado por Misaghi e Hassan (2005) como o parâmetro estatisticamente mais significativa para a estimação da velocidade operacional, de acordo com o estudo efetuado em várias curvas horizontais.

Relativamente aos efeitos da geometria da rasante na velocidade existe um menor número de estudos, possivelmente devido a uma menor importância que esta exerce sobre a velocidade dos condutores (Lobo *et al.*, 2013). No entanto, destaca-se alguma pesquisa relevante nesse sentido, como os modelos de Fitzpatrick *et al.* (2000b) e Gibreel *et al.* (2001) (referido por TRB, 2011). Os efeitos da largura do perfil transversal têm sido estudados por diversos autores, recorrendo a abordagens distintas, como é o exemplo de Lamm *et al.* (1988) onde são propostos vários modelos de velocidades para diferentes categorias de largura de via. Krammes *et al.* (1995) e McLean (1981) (referido por TRB, 2011) introduzem a velocidade na reta de aproximação e o conceito de velocidade desejada, respetivamente, nos seus modelos de estimação de velocidade em curva, procurando traduzir a influência das expectativas dos condutores através de variáveis que caracterizam os troços a montante e a jusante, consideradas na literatura como estando relacionadas principalmente com o campo de visão dos condutores. Existem ainda outros fatores considerados pelos investigadores na modelação da velocidade, *e.g.*, a extensão de retas ou curvas, a sobre-elevação e a velocidade máxima legal.

1.2.2 Indicadores de consistência do traçado

Como supracitado, grande parte da investigação e desenvolvimento de métodos de avaliação da homogeneidade do traçado foca-se, normalmente, em quatro grandes grupos: *velocidade operacional*, *estabilidade do veículo*, índices relacionados com a *geometria do traçado*, e *carga mental* do condutor. A *velocidade operacional*, de acordo com Gibreel *et al.* (1999), é o critério mais usado para avaliar a homogeneidade do traçado de uma estrada. Esta velocidade, normalmente definida como a velocidade correspondente ao percentil 85 da distribuição de velocidades de um conjunto de veículos que circulam em condições livres, pode ser usada como indicador da homogeneidade do traçado analisando as disparidades entre a velocidade base e a velocidade operacional, ou o diferencial da velocidade operacional entre elementos sucessivos da estrada. De acordo com vários trabalhos de investigação na área da segurança rodoviária, as transições de uma reta para uma curva representam as zonas mais críticas no que diz respeito à ocorrência de acidentes. Os modelos de avaliação da homogeneidade baseados na velocidade operacional são os mais amplamente usados devido ao grande número de modelos existente a nível internacional (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013). Leisch e Leisch (1977) recomendaram uma revisão do conceito de velocidade base que incluía indicações tanto para a redução de velocidade operacional como para o diferencial entre as velocidades base e operacional. Do mesmo modo, Kanellaidis *et al.* (1990) sugeriram que um traçado seguro pode ser alcançado quando a diferença entre a velocidade operacional na reta de aproximação e na curva não excede os 10 km/h. No entanto, o método normalmente mais usado para avaliação da homogeneidade do traçado foi desenvolvido por Lamm *et al.* (1999). Estes autores apresentaram dois critérios

de avaliação (designados de critérios I e II de Lamm), relacionados com a velocidade operacional, que incluía a diferença entre as velocidades base e operacional, e a diferença entre a velocidade operacional em elementos sucessivos do traçado. Embora a maioria dos critérios de avaliação recomendem limites de qualidade como “boa”, “aceitável” e “pobre” consistência do traçado, outros autores, como é o caso de Hassan (2004), sugerem funções contínuas como melhores ferramentas para os projetistas. O método desenvolvido por Lamm *et al.* (1999) permite avaliar a homogeneidade apenas num elemento geométrico do traçado ou na transição entre dois elementos. Outros estudos, como o que foi apresentado por Polus e Mattar-Habib (2004), recorrem a perfis contínuos de velocidades para determinar a variação da velocidade ao longo de um segmento de estrada. Neste último caso, um único valor de consistência é obtido para a totalidade do troço de estrada.

Outro método que tem vindo a ser utilizado para avaliar a homogeneidade do traçado, em elementos isolados da estrada, é a análise de *estabilidade do veículo*, relativamente ao atrito transversal. Neste contexto, Lamm *et al.* (1999) apresentaram um critério de avaliação da consistência (designado de critério III de Lamm) que inclui a diferença entre o atrito transversal fornecido pela curva e o atrito transversal exigido pelos veículos. A diferença entre o atrito transversal assumido na curva (f_R , que depende da velocidade base) e o atrito exigido pelo veículo (f_{RA} , que depende da velocidade operacional), denotado por Δf_R , foi usado como representativo da estabilidade do veículo. De acordo com este critério, a consistência é considerada “boa” quando Δf_R é maior ou igual a 0,01, “aceitável” quando o seu valor se encontra entre 0,01 e $-0,04$, e “pobre” quando Δf_R é inferior a $-0,04$.

A abordagem mais simples para avaliar a homogeneidade do traçado é aquela que recorre ao uso de índices relacionados com a *geometria do traçado* (Hassan, 2004). Como exemplo destes índices temos o raio médio das curvas circulares (AR), a relação entre o raio máximo e o raio mínimo (RR), e a relação entre o raio de uma curva horizontal e o raio médio (CRR). Estes índices (designados por índices geométricos) podem ser usados para avaliar a homogeneidade do traçado e para identificar zonas de descontinuidade, e são calculados de forma mais expedita do que os derivados dos diagramas de velocidade (Cardoso, 2004).

A última abordagem para avaliar a homogeneidade do traçado prende-se com a *carga mental* do condutor. Vários métodos têm sido usados para modelar a “carga mental” e para medir o efeito que a homogeneidade do traçado tem sobre este parâmetro (Fitzpatrick *et al.*, 2000a). O método proposto por Messer *et al.* (1981) tem como objetivo a estimação da “carga mental” de uma forma subjetiva, e a hipótese fundamental do modelo desenvolvido é que a maior parte da informação usada pelos condutores para desempenhar a tarefa de condução é fornecida pela estrada e sua envolvente (Cardoso, 2004; Fitzpatrick *et al.*, 2000a). Ou seja, a “carga mental” é elevada quando o condutor se depara com geometrias complexas, e pode ser ainda mais elevada quando é surpreendido por combinações ou sequências de características geométricas acentuadas (Fitzpatrick *et al.*, 2000a). No estudo desenvolvido por Krammes *et al.* (1995) foi usado um método de oclusão da visão para determinar a “carga mental” de condução em curvas

horizontais, tendo concluído que esta aumenta linearmente com o aumento do grau de curvatura de uma curva horizontal.

1.3 Objetivos e metodologia geral

O presente trabalho de investigação centra-se no desenvolvimento de uma metodologia capaz de avaliar de forma simples e fidedigna, a homogeneidade do traçado associada a um trecho de estrada, de duas vias e dois sentidos, com faixa de rodagem única, vulgarmente designada por estrada rural de duas vias. Para o efeito, numa fase inicial é realizada uma revisão da literatura nacional e estrangeira sobre diversos métodos de avaliação dessa mesma homogeneidade. Devido ao uso de vários conceitos e limites fundamentais inerentes a essas metodologias, nomeadamente às que se aplicam no âmbito nacional, foi necessário complementar o estudo com um capítulo dedicado apenas à definição desses conceitos e designação dos vários limites.

Numa segunda fase, procedeu-se à recolha e tratamento de dados de tráfego que permitiram caracterizar a dinâmica de condução de um conjunto de condutores em estradas interurbanas, recorrendo a um veículo instrumentado provido de um sistema combinado de recolha de dados cinemáticos e registos de imagens de vídeo, da empresa Race Technology Ltd. Essa recolha de dados foi efetuada numa estrada interurbana nas proximidades da cidade de Viseu, e foi proposto um novo modelo de estimação da velocidade operacional com base nas observações, assim como um modelo de aceleração e de desaceleração, em função do raio das curvas circulares.

Com base nos dados de campo obtidos, é então desenvolvido e calibrado um método de previsão de perfis de velocidades e de avaliação da homogeneidade do traçado. Este método foi elaborado com base no modelo de *car-following* de Gipps e alguns parâmetros são estimados através de um processo de otimização, assente num algoritmo genético. Por fim, é efetuada uma análise comparativa entre os vários métodos de avaliação da homogeneidade do traçado e o método proposto, aplicada a um traçado fictício que integra trechos de estrada com traçado homogéneo e outros com traçado heterogéneo.

Em suma, o presente estudo tem os seguintes objetivos específicos:

- Revisão da literatura nacional e internacional sobre modelos de previsão de velocidades em condições livres e de avaliação da homogeneidade do traçado;
- Desenvolver equações de previsão da velocidade operacional em estradas de duas vias e dois sentidos, com faixa de rodagem única, vulgarmente designadas por estradas rurais de duas vias;
- Validar as modelações desenvolvidas para previsão da velocidade operacional em elementos do traçado;
- Determinar as variações de desaceleração e de aceleração dos veículos na aproximação e saída de elementos curvos, respetivamente;

- Desenvolver um modelo de estimação de perfis de velocidades e de avaliação da homogeneidade do traçado, ao longo de um segmento de estrada, com o objetivo de ser utilizado individualmente ou como complemento dos modelos existentes na literatura portuguesa;
- Análise comparativa dos resultados do modelo desenvolvido com as práticas nacionais e internacionais.

1.4 Estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se organizada em sete capítulos. Nos parágrafos seguintes faz-se uma breve descrição do conteúdo de cada capítulo.

Capítulo 1 – Introdução: apresenta a dissertação com um enquadramento do estudo desenvolvido, indica as motivações e os principais objetivos da investigação realizada e faz a presente enumeração da estrutura do texto.

Capítulo 2 – Homogeneidade do traçado e conceitos fundamentais: introduz alguns conceitos e limites necessários à aplicação de algumas metodologias aqui descritas, assim como uma breve descrição do que realmente se pode considerar um traçado homogéneo e consistente.

Capítulo 3 – Metodologias existentes de avaliação da homogeneidade do traçado: descreve detalhadamente as metodologias atuais no âmbito nacional no que diz respeito à avaliação da homogeneidade do traçado e apresenta outras de carácter internacional, mas que de algum modo se aproximam daquelas desenvolvidas para aplicação em estradas portuguesas. Na parte final do capítulo são indicadas algumas limitações dos modelos de estimação de velocidades existentes.

Capítulo 4 – Recolha e tratamento dos dados de campo: descreve a metodologia usada para a recolha dos dados de campo, assim como um conjunto detalhado de procedimentos utilizados no tratamento dos mesmos, fazendo, sempre que possível, um paralelismo com os diferentes métodos normalmente praticados em outros estudos.

Capítulo 5 – Desenvolvimento de uma proposta para avaliação da homogeneidade do traçado: avalia e apresenta o modelo de previsão de perfis de velocidades e avaliação da homogeneidade do traçado. Pode ser definido como o capítulo nuclear da dissertação, onde se encontram as várias equações propostas para a estimação da velocidade operacional em curvas e para o cálculo da desaceleração e da aceleração, na aproximação e saída das curvas, respetivamente, assim como a calibração e validação do modelo desenvolvido com base no modelo de *car-following* de Gipps. É também apresentado um indicador de homogeneidade⁴ do traçado, capacitado para uma análise quer em troços isolados do traçado quer na globalidade do mesmo.

⁴ Indicador de homogeneidade desenvolvido em paralelo com o modelo de previsão de perfis de velocidades, tendo por base a distância de desaceleração na aproximação a um elemento isolado do traçado.

Capítulo 6 – Análise comparativa de avaliação da homogeneidade do traçado: tendo-se desenvolvido no capítulo anterior um método de avaliação da homogeneidade do traçado, este capítulo apresenta uma análise comparativa entre os vários métodos descritos ao longo da dissertação e o método proposto, aplicados a um traçado fictício.

Capítulo 7 – Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros: sumariza as conclusões gerais da dissertação e introduz novas diretrizes de investigação relacionadas com o tema estudado.

2 Homogeneidade do traçado e conceitos fundamentais

2.1 Introdução

O conceito de homogeneidade do traçado pode ser definido como “a conformidade das características da sucessão de elementos do traçado da estrada à expectativa dos condutores não habituais que nela circulam” (Cardoso, 2004; InIR, 2010). Um traçado homogêneo não deve contrariar as expectativas naturais dos condutores nem a sua capacidade de conduzir em segurança (Glennon e Harwood, 1978). Este conceito foi introduzido com o objetivo de prevenir mudanças bruscas nas características geométricas de elementos contíguos do traçado, assim como determinadas combinações de elementos que não respeitem as expectativas dos condutores (Cardoso, 2004; InIR, 2010). Para Alexander e Lunenfeld (1986), a expectativa tem um papel importante na atividade de condução e relaciona-se com a prontidão em responder a determinadas situações, acontecimentos e informações de forma previsível e bem-sucedida.

De acordo com Messer (1980), uma inconsistência no traçado pode ser definida como uma característica geométrica ou uma combinação de várias características de elementos contíguos que provocam uma inesperada “carga mental” nos condutores, resultando numa condução insegura. Estas inconsistências do traçado surgem quando as características gerais do alinhamento se alteram entre elementos sucessivos da estrada (Fitzpatrick *et al.*, 2000a), podendo surpreender os condutores e resultar em velocidade inseguras (Lamm *et al.*, 1998).

O conceito de “carga mental” relaciona-se com a frequência com que um condutor tem de efetuar uma determinada atividade da tarefa de condução. Desse modo, a um traçado homogêneo (ou coerente) correspondem alinhamentos que se encontram de acordo com o esperado pelo condutor, e que não acarretam aumentos repentinos na “carga mental” associada

à condução, por exemplo, devido a maior velocidade de aproximação ou a menor distância de visibilidade (Cardoso, 2004; InIR, 2010).

2.2 Distinção entre homogeneidade e consistência

Na recente revisão da norma (InIR, 2010), o termo “homogeneidade” (do traçado) é usado para definir a coerência do traçado, enquanto a norma vigente (JAE, 1994) utiliza o termo “consistência” (do traçado). De acordo com a norma em vigor, a consistência do traçado deve estar em conformidade com a expectativa dos condutores, que é o “processo pelo qual estes, em função de um estímulo provocado pelas condições de circulação, reagem de acordo com a experiência obtida anteriormente perante estímulos idênticos”. Este conceito de consistência do traçado é, de uma forma simplista, muito semelhante ao que é apresentado na revisão recente da norma (InIR, 2010) para definir a homogeneidade do traçado. No entanto, a norma (JAE, 1994) introduz este conceito num capítulo intitulado “Consistência e homogeneidade do traçado”, dando a entender que se tratam de conceitos diferentes, e refere nesse mesmo capítulo a necessidade da compatibilidade entre a velocidade base e a velocidade do tráfego. Na revisão da norma (InIR, 2010), este capítulo é substituído por um intitulado “Condições de segurança e comodidade” e o termo “consistência” deixa de estar presente na totalidade do documento.

Contudo, Moreira (2000) aponta que existem diferenças entre o que é um traçado homogéneo e o que é uma estrada consistente, indicando que a consistência é um conceito muito mais abrangente que a homogeneidade. Um traçado considera-se homogéneo quando apresenta um mínimo de variações das suas características geométricas ao longo do seu trajeto, relacionando-se concretamente com a sua geometria, enquanto a consistência de uma estrada pressupõe uma coerência interna, não só do traçado mas também do meio envolvente e das ações que este conjunto exerce sobre o condutor. Assim, pode-se assegurar a homogeneidade através da variação da velocidade entre elementos sucessivos do traçado e desenvolver simultaneamente o conceito de consistência sempre que se limita esta variação em torno da velocidade de circulação pretendida (Moreira, 2000). Na revisão da norma (InIR, 2010) não existe qualquer distinção entre os conceitos de homogeneidade e de consistência.

Em outros países, como é o caso dos Estados Unidos, o *Highway Safety Manual* (HSM) (AASHTO, 2010) define o conceito de homogeneidade do traçado (*design consistency* na terminologia anglo-saxónica) como: *i*) a utilização de critérios uniformes em fase de projeto e construção de infraestruturas rodoviárias, por forma a evitar manobras perigosas que possam aumentar o risco de acidente; *ii*) a necessidade da geometria do traçado estar em conformidade com a expectativa do condutor; *iii*) a correlação equilibrada de elementos sucessivos do traçado com o objetivo de permitir aos condutores uma condução cómoda e segura, e que estes se apercebam atempadamente da existência de um perigo potencial.

Deste modo, no presente estudo, quando se utilizam os termos “homogeneidade” e “consistência” está-se implicitamente a falar do mesmo conceito.

2.3 Conceitos fundamentais de velocidade

2.3.1 Introdução

A velocidade é um parâmetro fundamental em engenharia de tráfego e existem vários conceitos associados à velocidade (*e.g.*, velocidade específica, velocidade base ou de projeto, velocidade operacional e velocidade de circulação) de acordo com a sua aplicação (Fitzpatrick *et al.*, 2003), e depende de múltiplos fatores (*e.g.*, condutor, volume de tráfego e tipo de veículo) (AASHTO, 2011). A velocidade pode ser definida como o “parâmetro fundamental para a escolha e controlo dos elementos geométricos do traçado” (InIR, 2010; JAE, 1994) e, de modo a obter estradas mais homogêneas, a atual norma (JAE, 1994) apresenta três conceitos de velocidade: a *velocidade base*, a *velocidade específica*, e a *velocidade do tráfego*. Resultante da revisão da norma (InIR, 2010) foi introduzido o conceito de *velocidade não impedida* em substituição do de velocidade específica (Roque, 2013). Existem vários fatores que influenciam a velocidade realmente praticada pelos condutores. Cardoso (1996) destaca os mais importantes e reúne-os em cinco grandes grupos: *i*) condutor (*e.g.*, extensão do percurso, sexo, idade e presença de passageiros); *ii*) estrada (*e.g.*, tipologia, características geométricas da curva circular, tipo de pavimento, características dos trainéis e número de vias); *iii*) tráfego (*e.g.*, volume, distribuição direcional, densidade e percentagem de veículos pesados); *iv*) envolvente (*e.g.*, condições atmosféricas e de visibilidade); *v*) veículo (*e.g.*, tipologia e “idade” dos veículos ligeiros). Nas secções seguintes são indicados vários conceitos de velocidade que se relacionam direta ou indiretamente com a homogeneidade do traçado.

2.3.2 Velocidade base ou velocidade de projeto

A velocidade base (ou velocidade de projeto) é definida pela atual norma (JAE, 1994) como a “velocidade máxima que deverá ser assegurada ao longo do traçado”. Esta definição está de acordo com a que existia anteriormente no manual norte-americano (AASHTO, 1994). É também designada como “uma velocidade arbitrada na elaboração de um projeto rodoviário, que condiciona algumas das características geométricas da estrada” (AASHTO, 2011; InIR, 2010; JAE, 1994). A velocidade adotada pelos condutores quando circulam numa estrada depende do traçado e do meio ambiente em que este se desenvolve, o que resulta numa velocidade que não coincide necessariamente com a velocidade base (InIR, 2010; JAE, 1994). Desse modo, a velocidade base, por si só, é inadequada para assegurar um traçado homogêneo (Cardoso, 2004).

2.3.3 Velocidade específica, velocidade não impedida e velocidade operacional

A velocidade específica define-se como a “velocidade máxima que pode ser obtida com segurança em qualquer elemento do traçado, considerado isoladamente” (JAE, 1994). Esta velocidade corresponde ao percentil 85 de uma distribuição teórica de velocidades cujo percentil 50 corresponde à velocidade base (Cardoso, 2004). Como referido anteriormente,

surge um novo conceito de velocidade introduzido na revisão da norma (InIR, 2010), a velocidade não impedida (em substituição da velocidade específica). Esta velocidade, seja referida como velocidade específica (JAE, 1994) ou velocidade não impedida (InIR, 2010), é um elemento que reflete a dinâmica do traçado, e tem especial interesse na análise da homogeneidade de uma estrada.

A velocidade de circulação de um veículo ligeiro, num trecho de estrada (reto ou curvo) com densidade de tráfego muito baixa e sem condicionantes devidas aos restantes condutores e nem a outros fatores (*e.g.*, condições atmosféricas adversas), toma a designação genérica de *velocidade de circulação não impedida*. Na prática pode considerar-se que um condutor circula sob condições de circulação livre quando menos de 25% dos condutores circulam em fila e os tempos de espaçamento para os veículos precedente e subsequente são superiores a seis e três segundos, respetivamente. A velocidade de circulação não impedida num trecho de estrada reto, toma a designação de *velocidade de circulação livre*. Podem-se ainda definir as estatísticas “média” e “percentil 85” sobre a distribuição das velocidades de circulação não impedida, correspondendo a primeira à *velocidade média de circulação não impedida* (designada em reta de *velocidade média de circulação livre*) e a última à *velocidade não impedida* (designada em reta de *velocidade desejada*) (InIR, 2010). No quadro seguinte apresentam-se os vários conceitos que dizem respeito à velocidade de circulação *não impedida*.

Quadro 2.1 – Conceitos de velocidade de circulação não impedida (InIR, 2010)

Tipo de trecho	Conceito de velocidade		
	Genérica	Distribuição estatística	
		Média	Percentil 85
Curva	Velocidade de circulação não impedida	Velocidade média de circulação não impedida	Velocidade não impedida
Reta	Velocidade de circulação livre	Velocidade média de circulação livre	Velocidade desejada

Na terminologia anglo-saxónica, existem ainda os conceitos de *free-flow speed (FFS)* pelo HCM (TRB, 2010), que se traduz como “velocidade livre de circulação” (ou velocidade em condições livres), e o de *operating speed* pela AASHTO (2011), que se traduz como “velocidade operacional” (não deve ser confundida com a velocidade de operação). O conceito de velocidade indicado no HCM (TRB, 2010) é semelhante à definição de velocidade operacional contemplada pela AASHTO (2011), sendo esta última frequentemente estimada pelo percentil 85 da distribuição de velocidades. Assim, estes dois conceitos presentes na literatura norte-americana são semelhantes ao conceito de *velocidade não impedida*.

2.3.4 Velocidade do tráfego

Uma vez que a velocidade específica (ou a velocidade não impedida) é um parâmetro que reflete a dinâmica do traçado, não seria prático nem justificável considerar esta velocidade

correspondente a cada elemento (reto ou curvo) ao definirem-se as características geométricas do traçado de uma estrada. Assim, considera-se como representativa da velocidade específica (ou da velocidade não impedida) a velocidade do tráfego, ou seja a “velocidade que se admite ser excedida somente por 15% dos veículos” (*i.e.*, velocidade correspondente ao percentil 85), considerada normalmente como uma velocidade crítica (InIR, 2010; JAE, 1994). A relação teórica estabelecida entre a velocidade do tráfego e a velocidade base permite que, ao nível do projeto, a velocidade do tráfego seja calculada a partir da velocidade base. Esta relação é a indicada no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Velocidade do tráfego nas estradas nacionais (InIR, 2010; JAE, 1994)

Velocidade base (km/h)	Velocidade do tráfego (km/h)	
	InIR (2010)	JAE (1994)
40	50	-
50	60	-
60	80	80
70	90	-
80	100	100
90	110	-
100	120	120
110	125	-
120	130	130
130	135	-
140	140	140

Foram incluídos na revisão da norma (InIR, 2010) os valores da velocidade do tráfego correspondentes às velocidades base não considerados anteriormente pela norma em vigor (JAE, 1994) e compreendidas no intervalo [40; 140] km/h (Roque, 2013). A velocidade do tráfego e a velocidade não impedida, ainda que tenham géneses distintas (teórica no primeiro caso e empírica no segundo), correspondem ao mesmo parâmetro da distribuição de velocidades (*i.e.*, percentil 85) pelo que deveriam apresentar valores idênticos (Cardoso, 1999).

2.3.5 Velocidade média e velocidade de operação

Um dos parâmetros que importa ter em conta quando da seleção das características técnicas relativas ao projeto do traçado de uma estrada é o nível de serviço pretendido (InIR, 2010). Este parâmetro é uma medida qualitativa das condições de circulação (*i.e.*, densidade do tráfego, velocidade média e percentagem de perda de tempo) asseguradas aos utilizadores por uma infraestrutura rodoviária (TRB, 2010), sendo caracterizado normalmente pela velocidade de operação, que é definida como a “maior velocidade média possível numa estrada, para um dado veículo e sob determinadas condições” (InIR, 2010; JAE, 1994). O cálculo da velocidade média (*average travel speed*, ATS) é efetuado recorrendo à metodologia presente no HCM (TRB, 2010) para estradas de duas vias, velocidade esta que, por sua vez, está dependente da velocidade livre de circulação e do volume de tráfego. Ou seja, a velocidade média adiciona à

velocidade livre de circulação os efeitos dos atrasos causados pelos demais utilizadores da estrada (Lobo *et al.*, 2013).

2.4 Conceitos fundamentais do traçado em planta

2.4.1 Alinhamentos retos e curvas circulares

No que respeita aos alinhamentos retos, nas estradas com faixa de rodagem única, com dois sentidos, a sua extensão mínima (em metros) deve ser seis vezes a velocidade base (em km/h); importa referir esta limitação devido à necessidade de verificar a sua conformidade no cálculo do diagrama de velocidades específicas (JAE, 1994). A extensão máxima dos alinhamentos retos (em metros) com inclinação constante deve ser vinte vezes a velocidade base (em km/h), não tendo, contudo, muita influência neste estudo, e relacionando-se apenas com a redução do encadeamento noturno e a monotonia da condução (InIR, 2010; JAE, 1994).

Relativamente às curvas circulares, e com o objetivo de obter um traçado homogêneo, é necessário haver uma correlação equilibrada entre os raios das sucessivas curvas circulares. Assim, os raios das curvas devem obedecer ao definido no diagrama da figura seguinte (JAE, 1994).

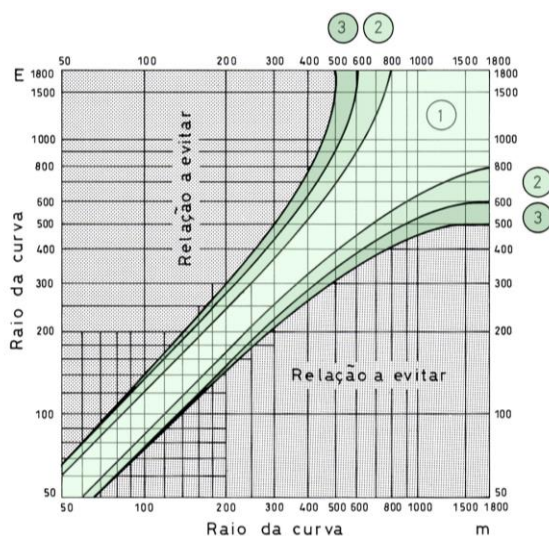


Figura 2.1 – Combinação de raios desejável: 1) relação muito boa; 2) relação boa; 3) relação aceitável (adaptado de JAE, 1994)

A revisão da norma (InIR, 2010) apresenta um diagrama semelhante, determinado com base na análise de acidentes e do comportamento dos condutores (Koeppel e Bock, 1970).

Para alguns valores de raios de curvas em planta apresenta-se no Quadro 2.3 a delimitação recomendada para os raios das curvas seguintes, e a relação entre eles, resultantes da utilização do supradito diagrama até ao limite considerado como relação aceitável (Moreira, 2000).

Quadro 2.3 – Análise dos raios entre curvas sucessivas (Moreira, 2000)

Raio (m)	$R_{\text{máxcseg}}$ (m)	$R_{\text{máxcseg}}/\text{Raio}$	$R_{\text{míncseg}}$ (m)	$\text{Raio}/R_{\text{míncseg}}$
100	150	1,50	75	1,33
200	300	1,50	150	1,33
300	500	1,67	210	1,43
400	750	1,87	260	1,54
500	1500	3,00	310	1,61
600	S/limite	-	350	1,71
800	S/limite	-	410	1,95
1000	S/limite	-	460	2,17
1500	S/limite	-	500	3,00

Decorrente da análise efetuada por Moreira (2000), verifica-se que na atual norma (JAE, 1994) a razão entre os raios é crescente com o aumento do valor do raio inicial, e que a situação de decréscimo de raios entre curvas consecutivas é a mais condicionante.

2.4.1.1 Relação entre alinhamentos retos e curvas circulares

É necessário que os raios mínimos das curvas circulares estejam relacionados com a extensão dos alinhamentos retos que os antecedem, por forma a garantir um traçado homogéneo (InIR, 2010; JAE, 1994). Estes raios devem ser os indicados no Quadro 2.4, desde que a velocidade base não obrigue a raios superiores (JAE, 1994).

Quadro 2.4 – Raios mínimos em função dos alinhamentos retos (JAE, 1994)

Tipo de estrada	Extensão do alinhamento reto (m)	Raio mínimo da curva circular (m)
IP e IC	$AR \geq 600$	Raio > 600
	$AR < 600$	Raio > AR
Outras estradas	$AR \geq 500$	Raio > 500

A revisão da norma (InIR, 2010) coloca de parte a metodologia presente no quadro anterior e apresenta uma nova, com base nos critérios de Lamm *et al.* (1999), que define as extensões mínimas e máximas dos alinhamentos retos e da sua relação com as curvas circulares, referido por Roque (2013) como um importante melhoramento relativamente à atual norma (JAE, 1994).

No Quadro 2.5 referem-se alguns parâmetros fundamentais do traçado em planta (InIR, 2010; JAE, 1994). A extensão mínima dos alinhamentos retos ($L_{\text{mín}}$) corresponde ao anteriormente referido, e os valores apresentados para os raios mínimos normais resultam da relação de vários parâmetros (*i.e.*, velocidade, sobre-elevação, *etc.*) abordados na secção seguinte. Os valores apresentados no quadro seguinte não sofreram alterações na revisão da norma (InIR, 2010) e a única diferença prende-se com a inclusão da extensão mínima dos alinhamentos retos para velocidades base de 40 km/h e 50 km/h, velocidades estas que não estão presentes na atual norma (JAE, 1994). Tal deve-se a uma tentativa de inclusão, nesta revisão, de critérios aplicáveis a trechos de estrada que atravessam espaços urbanos ou urbanizados.

Quadro 2.5 – Extensão mínima dos alinhamentos retos e raio mínimo normal (InIR, 2010; JAE, 1994)

Velocidade base (km/h)	Extensão mínima dos alinhamentos retos (m)	Raio mínimo normal (m)
40	240	110
50	300	180
60	360	250
70	420	350
80	480	450
90	540	550
100	600	700
110	660	850
120	720	1000
130	780	1200
140	840	1400

Relativamente à atual norma (JAE, 1994), para as velocidades base de 60 km/h, 70 km/h e 80 km/h em estradas do tipo IP e IC, os raios mínimos em curva indicados no Quadro 2.5 são revogados pela relação que devem ter com a extensão dos alinhamentos retos que os antecedem indicada no Quadro 2.4 (Moreira, 2000).

2.4.2 Raios mínimos das curvas circulares

2.4.2.1 Considerações teóricas

A geometria das curvas deve basear-se numa relação adequada entre a velocidade base e o raio de curvatura, e da relação conjunta destes parâmetros com a sobre-elevação e o coeficiente de atrito lateral. Quando um veículo percorre uma curva exerce uma aceleração centrípeta que o desvia para o interior da curva, sendo que esta aceleração é obtida a partir do atrito transversal que se desenvolve entre os pneus e o pavimento e da componente do peso do veículo, resultante da introdução da sobre-elevação. A aceleração centrípeta é por vezes equiparada à força centrífuga mas esta é uma força imaginária que os condutores acreditam que os desvia para o exterior da curva, quando, de facto, o efeito que realmente sentem é o veículo a acelerar para o interior (AASHTO, 2011). Desse modo, o conceito de “aceleração centrífuga” é muitas das vezes usado em normas e outros documentos de forma incorreta.

2.4.2.2 Considerações gerais

O coeficiente de atrito entre os pneus e um pavimento com gelo é de cerca de 0,1, o que revela que neste caso um veículo parado, ou que se desloque muito lentamente, tem propensão a deslizar para o centro da curva quando a sobre-elevação for da ordem de 10%. Deste modo, a sobre-elevação é limitada, na maioria dos países europeus, a 7% (InIR, 2010; JAE, 1994). Considerando os mesmos pressupostos, e a título comparativo, nos Estados Unidos o valor máximo da sobre-elevação pode ser de 8% (AASHTO, 2011, pp. 3–30).

Tendo em conta o valor da sobre-elevação de 7% e o valor máximo do coeficiente de atrito transversal correspondente a cada velocidade, determinam-se os raios mínimos absolutos. Estes raios devem ser utilizados excepcionalmente, pois a sua utilização tem como consequência

acelerações centrípeta de valor elevado, que para velocidades inferiores a 80 km/h são idênticas ao máximo admissível para que ainda haja segurança e comodidade (0,22 g), sendo g a aceleração da gravidade (9,8 m/s²). Assim, por forma a garantir uma circulação segura e cómoda, é necessário determinar os raios mínimos normais, pelo que neste caso a aceleração centrípeta deverá ter um valor correspondente a 50% do valor máximo admissível (InIR, 2010; JAE, 1994). É indicada uma expressão na atual norma (JAE, 1994) e na sua revisão (InIR, 2010), também referida pela AASHTO (2011), para o cálculo dos raios mínimos em função da velocidade base, coeficiente de atrito transversal e sobre-elevação, a qual resulta da expressão seguinte:

$$R \geq \frac{V^2}{g(\mu + SE)} \quad (2.1)$$

onde R é o raio da curva circular (m), V é a velocidade base (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²), μ é o coeficiente de atrito transversal, e SE é a sobre-elevação. Esta expressão diz respeito ao movimento circular uniforme num plano inclinado, com atrito, e permite calcular o raio mínimo das curvas circulares deduzida tendo em conta a condição de equilíbrio em relação ao deslizamento lateral (Branco *et al.*, 2001).

2.4.2.3 Raios mínimos absolutos

Como referido anteriormente, fixando o valor da sobre-elevação em 7%, e com o valor máximo do coeficiente de atrito transversal em função da velocidade, determinam-se os raios mínimos absolutos indicados no Quadro 2.6. Estes valores do coeficiente de atrito transversal (Wright e Paquette, 1987) não diferem muito dos preconizados pelas *Normas de projeto* (JAE, 1978), exceto no que diz respeito às velocidades mais baixas, onde se verifica alguma diferença, que é, no entanto, desprezável do ponto de vista de aplicação para efeitos do cálculo dos raios mínimos (Branco *et al.*, 2001).

Quadro 2.6 – Raios mínimos absolutos pela equação (2.1) e pela norma (JAE, 1994), e aceleração centrípeta para cada raio mínimo absoluto (adaptado de Branco *et al.*, 2001)

Velocidade base (km/h)	μ	SE	Equação (2.1)		JAE (1994)	
			RA (m)	a_c (g)	RA (m)	a_c (g)
40	0,17	0,07	52,49	0,240	55	0,229
50	0,16	0,07	85,58	0,230	85	0,232
60	0,16	0,07	123,24	0,230	130	0,218
70	0,15	0,07	175,36	0,220	180	0,214
80	0,14	0,07	239,95	0,210	240	0,210
90	0,13	0,07	318,88	0,200	320	0,199
100	0,12	0,07	414,40	0,190	420	0,187
110	0,11	0,07	529,28	0,180	560	0,170
120	0,10	0,07	666,93	0,170	700	0,162
130	0,09	0,07	831,64	0,160	900	0,148
140	0,08	0,07	1028,81	0,150	1200	0,129

Nota-se um arredondamento efetuado nos valores obtidos pela equação (2.1) para dar origem aos valores da norma (JAE, 1994). Trata-se de uma aproximação ao valor inteiro e múltiplo de cinco, sem nenhum outro significado (Branco *et al.*, 2001). Pode-se constatar que para velocidades inferiores a 80 km/h os valores da aceleração centrípeta encontram-se próximos do máximo admissível para que se garanta segurança e comodidade (0,22 g), como indicado previamente. Uma das diferenças na revisão da norma (InIR, 2010) é a indicação dos coeficientes de atrito transversal correspondentes a cada velocidade para o cálculo dos raios mínimos absolutos, situação que não existe na norma (JAE, 1994). Apresenta-se de seguida um quadro com o cálculo dos respetivos valores dos raios mínimos utilizando os coeficientes de atrito transversal presentes na revisão da norma (InIR, 2010).

Quadro 2.7 – Raios mínimos absolutos pela equação (2.1) e pela revisão da norma (InIR, 2010), e aceleração centrípeta para cada raio mínimo absoluto

Velocidade base (km/h)	μ	SE	Equação (2.1)		InIR (2010)	
			RA (m)	a_c (g)	RA (m)	a_c (g)
40	0,16	0,07	54,77	0,230	55	0,229
50	0,16	0,07	85,58	0,230	85	0,232
60	0,15	0,07	128,84	0,220	130	0,218
70	0,14	0,07	183,72	0,210	180	0,214
80	0,14	0,07	239,95	0,210	240	0,210
90	0,13	0,07	318,88	0,200	320	0,199
100	0,12	0,07	414,40	0,190	420	0,187
110	0,10	0,07	560,41	0,170	560	0,170
120	0,09	0,07	708,62	0,160	700	0,162
130	0,08	0,07	887,08	0,150	900	0,148
140	0,06	0,07	1187,08	0,130	1200	0,129

Os valores apresentados na revisão da norma (InIR, 2010) relativamente aos raios mínimos absolutos (valores arredondados) são os mesmos que se encontram presentes na atual norma (JAE, 1994).

2.4.2.4 Raios mínimos normais

Como referido anteriormente, ao limitar a aceleração centrípeta a 50% do valor máximo admissível, isto é, 0,11 g (1,078 m/s²), definem-se os raios mínimos normais para diferentes valores de velocidade indicados no Quadro 2.8. Estes raios são determinados a partir da seguinte expressão:

$$a_c = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

onde a_c é a aceleração centrípeta (m/s²), V é a velocidade (m/s), e R é o raio da curva circular (m).

Quadro 2.8 – Raios mínimos normais pela equação (2.2) e pela norma (JAE, 1994), e aceleração centrípeta para cada raio mínimo normal (adaptado de Branco *et al.*, 2001)

Velocidade (km/h)	a_c (g)	a_c (m/s ²)	Equação (2.2)	JAE (1994)
			RN (m)	RN (m)
40	0,110	1,078	114,52	110
50	0,110	1,078	178,94	180
60	0,110	1,078	257,68	250
70	0,110	1,078	350,73	350
80	0,110	1,078	458,10	450
90	0,110	1,078	579,78	550
100	0,110	1,078	715,77	700
110	0,110	1,078	866,09	850
120	0,110	1,078	1030,72	1000
130	0,110	1,078	1209,66	1200
140	0,110	1,078	1402,92	1400

Também neste caso se pode notar um arredondamento efetuado nos valores obtidos para dar lugar aos valores patentes na norma (JAE, 1994). Trata-se de uma aproximação ao valor inteiro, sem nenhum outro significado (Branco *et al.*, 2001). Os valores apresentados na revisão da norma (InIR, 2010) relativamente aos raios mínimos normais (valores arredondados) são os mesmos que se encontram presentes na atual norma (JAE, 1994).

2.4.3 Curvas de transição

A curva de transição é parte constituinte de uma curva de concordância (que no caso do traçado em planta corresponde à curva que estabelece a ligação entre dois alinhamentos retos), e define-se como uma curva “em geral de raio variável, que estabelece a ligação de um alinhamento reto a uma curva circular ou de duas curvas circulares” (InIR, 2010; JAE, 1994; LNEC, 1973). As curvas de transição têm a função de assegurar a variação uniforme da aceleração entre os alinhamentos retos e as curvas circulares e, caso seja necessário, permitir efetuar convenientemente a introdução e supressão da sobre-elevação e da sobrelargura. É recomendável que as curvas de transição sejam do tipo clotóides, devido à variação uniforme da aceleração centrípeta a que um veículo está sujeito, desde o alinhamento reto até à curva circular. A clotóide é uma curva tal que “o raio de curvatura é inversamente proporcional à abcissa curvilínea, medida a partir da origem da curva” (InIR, 2010; JAE, 1994), ou seja o seu raio de curvatura diminui à medida que um veículo percorre o seu desenvolvimento e no ponto de interseção da clotóide com a curva circular a sua curvatura é igual à da curva circular. A clotóide apresenta a seguinte expressão:

$$A^2 = R \cdot L \quad (2.3)$$

onde A é o parâmetro da clotóide (m), R é o raio da curva circular (m), e L é a extensão da clotóide (m). Os valores mínimos do parâmetro da clotóide em função da velocidade base são indicados na atual norma (JAE, 1994); estes valores sofreram alterações na revisão da norma

(InIR, 2010) tendo sido calculados para o raio mínimo normal (Roque, 2013). As curvas de transição são dispensadas quando as curvas circulares não necessitam de sobre-elevação, isto é, quando o raio do arco circular é superior a um valor mínimo, em função da velocidade base. Esse valor pode ser consultado no Quadro 2.9.

Quadro 2.9 – Raios mínimos sem sobre-elevação em função da velocidade base (InIR, 2010; JAE, 1994)

Velocidade base (km/h)	Raio mínimo (m)
$VB \leq 100$	$RS \geq 2500$
$VB > 100$	$RS \geq 5000$

3 Metodologias existentes de avaliação da homogeneidade do traçado

3.1 Introdução

Em fase de projeto, a variação da velocidade ao longo da estrada é um fator importante a considerar na adaptação da geometria do traçado às expectativas do condutor. Para atingir este objetivo são utilizados critérios de velocidade para avaliar a homogeneidade do traçado. A possibilidade de determinar a velocidade operacional na fase inicial de projeto poderá permitir desenvolver um traçado mais seguro e homogéneo. A diretriz de uma estrada, constituída por trechos retos ligados por curvas horizontais e outros elementos de transição, é um dos elementos que mais impacto tem na condução e segurança de uma estrada (Ambros *et al.*, 2015). Para Hummer *et al.* (2010), as curvas horizontais são locais de especial interesse devido ao seu alto risco de acidente resultante das forças centrípetas exercidas no veículo, da expectativa do condutor, e de outros fatores. Desse modo, as transições de um trecho reto para uma curva são secções críticas relativamente à segurança de circulação numa estrada. É aceitável afirmar, portanto, que existe uma relação entre a segurança e a homogeneidade do traçado. Então, um traçado homogéneo permitirá que os demais condutores efetuem uma condução em segurança ao longo da estrada à velocidade desejada (Lamm *et al.*, 1998).

Com o objetivo de desenvolver um traçado mais seguro e homogéneo, as entidades gestoras das infraestruturas rodoviárias e investigadores do mundo académico desenvolveram modelos de estimação da velocidade operacional e indicadores de consistência do traçado, resultando em diversas metodologias para avaliar a homogeneidade do mesmo. Neste capítulo são abordados vários métodos desenvolvidos em Portugal, assim como métodos elaborados em outros países e modelos alternativos de estimação da velocidade operacional, desaceleração e aceleração, e as suas limitações mais relevantes.

3.2 Método da Junta Autónoma de Estradas

3.2.1 Introdução

O estudo e análise das velocidades é o critério habitualmente mais utilizado para avaliar a homogeneidade do traçado de uma estrada, particularmente ao nível da variação da velocidade específica entre elementos consecutivos, que de acordo com a atual norma (JAE, 1994) é o principal parâmetro da avaliação dessa mesma homogeneidade, materializado no diagrama de velocidades específicas. O método desenvolvido e que se encontra descrito na norma (JAE, 1994) consiste em inicialmente determinar as velocidades específicas nos vários elementos do traçado (*i.e.*, retas, curvas circulares e curvas de transição) e, admitindo uma aceleração e desaceleração constante, assim como uma velocidade constante nas curvas, calcular o diagrama de velocidades específicas com o objetivo de avaliar a homogeneidade do traçado em estradas rurais de duas vias. Este método é descrito nas secções seguintes e, sempre que seja relevante, é indicada a necessidade de recorrer aos conceitos referidos no capítulo anterior. Por último, é apresentado um exemplo de aplicação do método a uma estrada de duas vias, com faixa de rodagem única, e com dois sentidos de trânsito.

3.2.2 Princípios básicos

O conhecimento das velocidades específicas numa estrada, de acordo com a presente norma (JAE, 1994), é fundamental para avaliar as condições de segurança nessa mesma estrada. Analogamente para a determinação da qualidade de serviço assegurada pelo projeto é essencial conhecer o diagrama de velocidades específicas. Este diagrama é a “representação gráfica da variação da velocidade específica ao longo do traçado” (JAE, 1994) e permite avaliar a sua homogeneidade e determinar a existência de diferenças de velocidades perigosas. As hipóteses consideradas para a construção do diagrama são as seguintes:

- i) O condutor do veículo escolhe a velocidade de acordo com a geometria das curvas circulares;
- ii) Nos alinhamentos retos e nas curvas de transição a velocidade será a correspondente à velocidade do tráfego considerada no projeto, que depende da velocidade base;
- iii) O condutor do veículo adapta a velocidade às características geométricas do elemento do traçado que se segue imediatamente àquele em que circula;
- iv) A desaceleração termina no início da curva circular, e a aceleração inicia-se no fim da curva circular;
- v) A desaceleração e a aceleração são iguais e constantes em valor absoluto ($0,8 \text{ m/s}^2$). A estes valores corresponde normalmente uma condução sem utilização dos travões, no caso de redução de velocidade, e a uma ligeira pressão no acelerador, no caso de aumento de velocidade.

Os valores de desaceleração e aceleração, referidos anteriormente no ponto v), não se encontram fundamentados na norma (JAE, 1994). No entanto, são semelhantes aos valores indicados no estudo efetuado por Krammes *et al.* (1995); estes autores assumem no seu modelo que as velocidades também são constantes na curva, e que os valores de desaceleração e aceleração são iguais e constantes em módulo ($0,85 \text{ m/s}^2$), tendo sido retirados do modelo desenvolvido por Lamm *et al.* (1988). Estes valores foram posteriormente refutados por vários autores, como é o caso do estudo efetuado por Fitzpatrick *et al.* (2000b), tendo sido observados apenas em curvas com raios inferiores a 250 metros.

3.2.3 Descrição geral do procedimento de cálculo

O cálculo deste diagrama permite detetar zonas perigosas no traçado de uma estrada e efetuar as alterações necessárias, sendo indispensável determinar:

- a) A velocidade específica de cada elemento isolado (alinhamentos retos, curvas de transição e curvas circulares);
- b) O início das zonas de aceleração e o fim das zonas de desaceleração;
- c) As distâncias de transição (aceleração e desaceleração).

Assim, de acordo com a norma (JAE, 1994), nos alinhamentos retos a velocidade específica será igual à velocidade do tráfego, considerada no projeto, desde que a sua extensão seja superior à extensão mínima correspondente à velocidade base; no caso de tal não se verificar, adotar-se-á a menor das velocidades específicas das curvas que delimitam o alinhamento reto. A norma (JAE, 1994) admite que a velocidade do tráfego é representativa da velocidade específica em reta, possivelmente devido à dificuldade em determinar esta velocidade, tornando o procedimento numa análise mista, uma vez que a velocidade do tráfego tem associado um caráter de segurança, pois ao estar indexada à velocidade base aquela perde a individualização do elemento geométrico, tornando-a numa velocidade associada a um trecho de estrada (Moreira, 2000). Nas curvas circulares, a velocidade específica é determinada em função do raio e a sua estimação é abordada na secção seguinte. Por sua vez, a distância de transição, ou seja a extensão das zonas de aceleração e desaceleração, é definida na norma (JAE, 1994) como a distância ao longo da qual se efetua a variação da velocidade específica entre dois elementos consecutivos do traçado. Convém referir que em estradas de duas vias e dois sentidos, como é o caso deste estudo, o diagrama deve ser traçado para os dois sentidos de trânsito.

3.2.4 Estimação da velocidade específica em curvas circulares

A norma (JAE, 1994) indica que para garantir a segurança de circulação é necessário que a velocidade específica de cada curva não seja inferior em mais de 30 km/h à velocidade específica no alinhamento reto que a precede. Pela equação (2.1), e atendendo aos pressupostos para o cálculo dos raios mínimos absolutos apresentados no capítulo anterior, define-se o raio em função da velocidade no Quadro 3.1. Estes valores correspondem aos apresentados no capítulo anterior no Quadro 2.6.

Quadro 3.1 – Raios mínimos absolutos em planta calculados pela equação (2.1)

Velocidade (km/h)	Raio (m)
40	52,49
50	85,58
60	123,24
70	175,36
80	239,95
90	318,88
100	414,40
110	529,28
120	666,93
130	831,64
140	1028,81

Dado que o coeficiente de atrito transversal está diretamente relacionado com a velocidade, como suprarreferido, torna-se necessário, através de uma análise de regressão não-linear, determinar uma expressão que possibilite determinar a velocidade específica de um veículo conhecendo apenas o raio da curva circular, e para outros valores de raios que não aqueles indicados na norma (JAE, 1994). Assim, e considerando os valores indicados no Quadro 3.1, obtém-se o diagrama representado na figura seguinte.

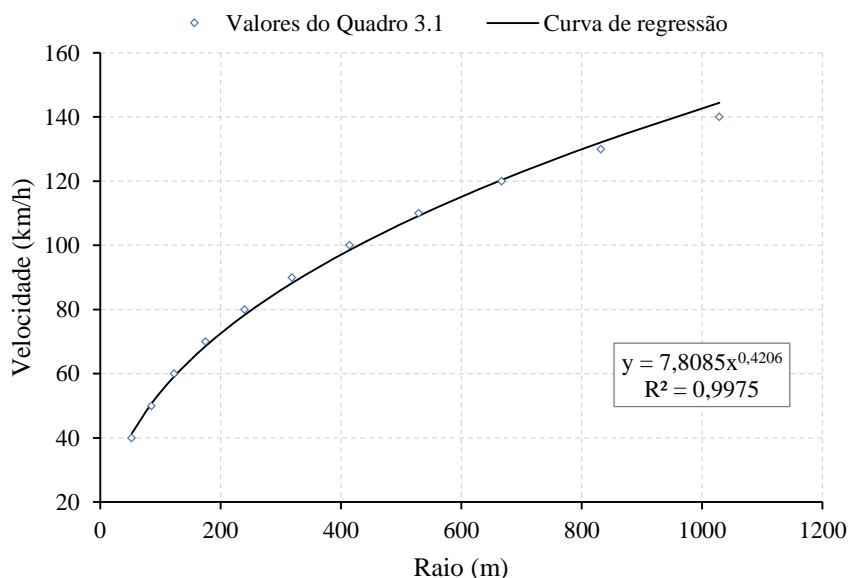


Figura 3.1 – Análise de regressão não-linear utilizando os valores do Quadro 3.1

Desta análise resulta uma expressão dimensionalmente não homogénea que relaciona duas variáveis, *i.e.*, a velocidade (variável dependente) e o raio (variável independente), e é representada da seguinte forma:

$$VE = 7,8085 R^{0,4206} \tag{3.1}$$

onde VE é a velocidade específica em curva (km/h), e R é o raio da curva circular (m). Esta expressão é válida para os limites indicados no Quadro 3.1. No entanto, a norma (JAE, 1994) limita a velocidade específica para estradas de duas vias em 120 km/h, pelo que para raios superiores a 666,93 m (valor de acordo com o Quadro 3.1) a velocidade específica será sempre igual a 120 km/h. Note-se que na revisão da norma (InIR, 2010), a velocidade base de 100 km/h (que corresponde a uma velocidade do tráfego de 120 km/h) foi eliminada para estradas de faixa única, pois é superior à velocidade máxima permitida por lei para estradas deste tipo (Roque, 2013). O modelo estatístico apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,9975, o que significa que o modelo de regressão escolhido se ajusta bastante bem à amostra. No Quadro 3.2 são apresentados alguns valores da velocidade específica nas curvas, em função do raio, e comparados com os valores da atual norma (JAE, 1994). Para os raios intermédios deverá ser adotada a velocidade específica imediatamente superior, ou calcular o valor exato através da equação (3.1).

Quadro 3.2 – Velocidade específica em curvas calculada pela equação (3.1) e pela norma (JAE, 1994) para estradas com duas vias

Raio (m)	Velocidade específica (km/h)	
	Equação (3.1)	JAE (1994)
120	58,49	60
180	69,36	70
210	74,01	75
240	78,29	80
280	83,53	85
320	88,36	90
370	93,92	95
420	99,06	100
470	103,86	105
530	109,24	110
580	113,47	115
620 ≥ 620	116,69	120
$\geq 662,58$	120,00	-

Estes valores indicados no quadro anterior calculados pela equação (3.1) encontram-se muito próximos dos valores apresentados na norma (JAE, 1994), sendo que a diferença mais significativa se prende com o valor do raio correspondente à velocidade específica de 120 km/h, que na norma é 620 metros ao contrário do que resulta da equação (3.1) que é 662,58 metros (valor muito próximo do que se encontra no Quadro 3.1 que é 666,93 m). Para velocidades base mais baixas, os respetivos raios mínimos normais originam uma velocidade específica em curva superior à velocidade específica em reta, no mínimo questionável (Moreira, 2000). Desse modo, Moreira (2000) propõe, resultado da sua análise entre elementos geométricos sucessivos, uma limitação não de raios mínimos, mas sim de raios máximos para as velocidades base de 60 km/h e 80 km/h, raios esses que seriam os correspondentes à aplicação de um diferencial máximo de 20 km/h a estas velocidades base.

3.2.5 Distância de transição e distância de visibilidade de decisão

3.2.5.1 Distância de transição

A norma (JAE, 1994) define a distância de transição (*DT*) como a distância ao longo da qual se efetua a variação da velocidade específica entre dois elementos consecutivos do traçado. Esta distância representa a extensão das zonas de aceleração e desaceleração. É indicada na norma (JAE, 1994) uma expressão para o cálculo da distância de transição em função das velocidades específicas de dois elementos consecutivos do traçado. Essa expressão não é mais do que uma versão simplificada da equação (3.2), que é indicada de seguida, considerando o valor da aceleração e desaceleração igual a $0,8 \text{ m/s}^2$, valor este referido pela norma (JAE, 1994) como o valor que corresponde normalmente a uma condução sem aplicação dos travões. É também apresentado um ábaco com os valores das distâncias de transição para uma situação de aceleração ou desaceleração. No entanto, os valores do ábaco nem sempre correspondem aos valores calculados pela expressão simplificada indicada na norma (JAE, 1994) (ver Apêndice A). Como exemplo, numa situação de desaceleração de 100 km/h para 60 km/h, o valor da expressão simplificada para a distância de transição é 320,00 m, pelo ábaco é 310,00 m, e pela equação (3.2) o resultado é 308,64 m. A expressão exata para o cálculo da aceleração e desaceleração é a seguinte:

$$a = \frac{v^2 - u^2}{2s} \quad (3.2)$$

onde a é a aceleração (m/s^2), v é a velocidade final (m/s), u é a velocidade inicial (m/s), e s é a distância percorrida (m). Esta expressão pode-se traduzir de modo a que v e u sejam as velocidades específicas entre dois elementos consecutivos, e s seja a distância de transição. De acordo com Moreira (2000), para qualquer velocidade base, o comprimento mínimo para os alinhamentos retos indicados na norma (JAE, 1994) é sempre igual ou superior à distância de transição ao longo da qual se fará a variação da velocidade específica (variação máxima de 20 km/h) entre elementos sucessivos, tornando assim dispensável esta verificação.

3.2.5.2 Distância de visibilidade de decisão

Além da distância de transição, é necessário considerar a distância de visibilidade de decisão (*DD*) (JAE, 1994), que depende da velocidade do tráfego (ou da velocidade específica), e é calculada empiricamente pela seguinte expressão:

$$DD = 3,3VT \quad (3.3)$$

onde DD é a distância de visibilidade de decisão (m), e VT é a velocidade do tráfego (km/h). É definida como a distância de visibilidade necessária para que um condutor se aperceba de uma

informação inesperada, ou de uma alteração nas características da estrada, *i.e.*, sempre que as expectativas do condutor sejam alteradas (InIR, 2010; JAE, 1994). Esta distância de visibilidade de decisão, numa situação de desaceleração precedendo uma curva, deve ser sempre superior à distância de transição, pois a norma (JAE, 1994) admite que a apreciação dos alinhamentos curvos, *i.e.*, o que permite aos condutores adaptarem a sua velocidade à geometria do traçado, é efetuada ao percorrer a distância de visibilidade de decisão. É também referido na norma (JAE, 1994) que as distâncias de transição devem ser inferiores às distâncias de visibilidade de decisão. Ou seja é uma limitação mais abrangente que o referido previamente. Porém, quando respeitada a variação máxima da velocidade específica de 20 km/h, esta imposição é sempre cumprida (Moreira, 2000). Este diferencial máximo de velocidades específicas é um dos limites impostos pela norma (JAE, 1994) e será referido na secção seguinte.

3.2.6 Cálculo do diagrama de velocidades específicas

3.2.6.1 Considerações gerais

A construção deste diagrama, como referido anteriormente, permite identificar zonas perigosas e efetuar as alterações necessárias no traçado. A fim de garantir a homogeneidade do traçado, deve-se assegurar que as velocidades específicas de dois elementos consecutivos não devem diferir mais de 20 km/h; no caso da velocidade específica ser inferior a 70 km/h, essa diferença deverá ser de 10 km/h (JAE, 1994). Contudo, de acordo com Moreira (2000), fica a dúvida do que a norma (JAE, 1994) considera “elementos sucessivos”, se quer dizer “elementos curvos sucessivos”, ou dois elementos sucessivos quaisquer, como sejam um alinhamento reto seguido de uma curva. Esta questão levanta-se pois a norma (JAE, 1994) também estabelece que a velocidade específica de uma curva em relação à velocidade específica do alinhamento reto que a precede, não deve ser inferior em mais de 30 km/h (como indicado no início da secção 3.2.4), ou seja estaria imediatamente abrangida pela regra entre elementos consecutivos, referida anteriormente. Da análise efetuada por Moreira (2000), verifica-se que ao respeitar-se os raios mínimos normais, ou mesmo os raios mínimos absolutos, pelos critérios indicados na norma para a determinação da velocidade específica, os limites de variação da velocidade específica entre elementos sucessivos (*i.e.*, 20 km/h para velocidades específicas superiores a 70 km/h) estão automaticamente respeitados.

3.2.6.2 Elementos básicos do diagrama de velocidades específicas

Por forma a estabelecer os parâmetros iniciais para a construção do diagrama de velocidades, é necessário determinar as velocidades específicas de cada elemento isolado (alinhamentos retos, curvas circulares e curvas de transição), o início das zonas de aceleração e o fim das zonas de desaceleração, e, por fim, determinar as distâncias de transição. Na Figura 3.2 representam-se onde se encontram, num qualquer elemento isolado do traçado, o início das zonas de aceleração e o fim das zonas de desaceleração.

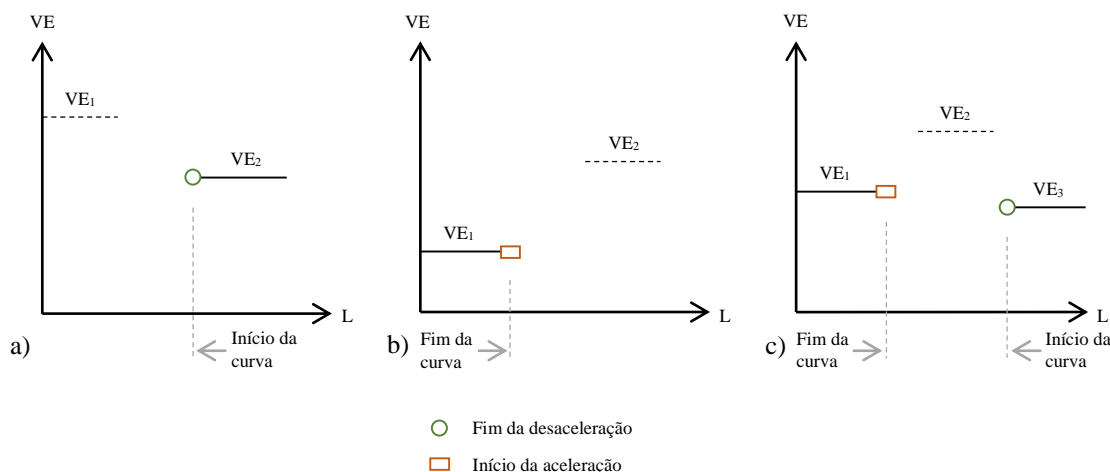


Figura 3.2 – Início das zonas de aceleração e fim das zonas de desaceleração: a) zona de aproximação à curva; b) zona de saída da curva; c) zona de transição entre duas curvas (adaptado de JAE, 1994)

As distâncias de transição, que representam a extensão das zonas de aceleração e desaceleração, são representadas como se indica na Figura 3.3. Estas duas figuras (Figura 3.2 e Figura 3.3) representam os elementos básicos necessários à construção do diagrama de velocidades específicas.

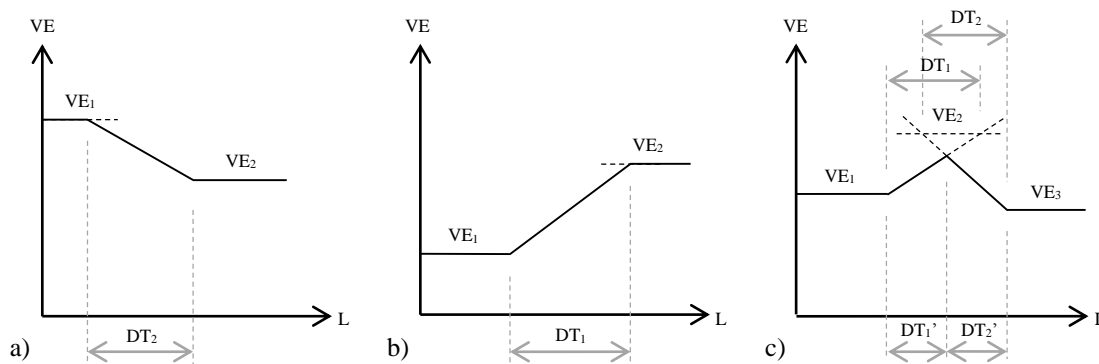


Figura 3.3 – Distâncias de transição (aceleração e desaceleração): a) zona de aproximação à curva; b) zona de saída da curva; c) zona de transição entre duas curvas (adaptado de JAE, 1994)

3.2.6.3 Exemplo de cálculo do diagrama de velocidades específicas

Apresenta-se de seguida um procedimento ilustrativo, utilizando um exemplo muito semelhante ao que é indicado na norma (JAE, 1994), para a construção do diagrama de velocidades específicas. O procedimento é o seguinte:

- i) O diagrama deve ser realizado à escala, sendo que o eixo das abcissas corresponde à extensão dos elementos e o eixo das ordenadas à velocidade específica;

- ii) Partindo do traçado em planta de um trecho de estrada, como seja o exemplo apresentado na Figura 3.4, identificam-se e delimitam-se os elementos que o constituem (*e.g.*, alinhamentos retos, curvas de transição e curvas circulares);

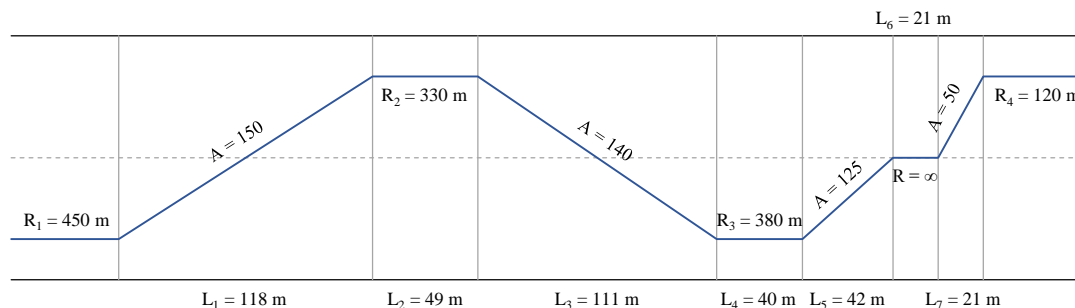


Figura 3.4 – Exemplo do traçado em planta de um trecho de estrada (adaptado de JAE, 1994)

- iii) De seguida determinam-se as velocidades específicas desses mesmos elementos e assinalam-se essas velocidades no diagrama (Figura 3.5):
- Nos alinhamentos retos e nas curvas de transição, a velocidade específica será igual à velocidade do tráfego, velocidade essa que está diretamente relacionada com a velocidade base (ver Quadro 2.2). No caso dos alinhamentos retos, é necessário que a sua extensão seja superior à extensão mínima correspondente à velocidade base (ver Quadro 2.5), caso contrário adotar-se-á a menor das velocidades específicas das curvas que delimitam o alinhamento reto (ver secção 3.2.6.4 para uma análise detalhada desta limitação);
 - A velocidade base considerada no exemplo da Figura 3.4 é de 80 km/h, à qual corresponde uma velocidade de tráfego de 100 km/h, sendo esta a velocidade específica nos alinhamentos retos e curvas de transição, com exceção do caso referido no ponto anterior;
 - A velocidade específica nas curvas em função do raio é obtida diretamente pelo Quadro 3.2, ou pela equação (3.1). Assim resultam os seguintes valores da velocidade específica: $VE_1 = 101,98$ km/h ($R_1 = 450$ m), $VE_2 = 89,51$ km/h ($R_2 = 330$ m), $VE_3 = 94,98$ km/h ($R_3 = 380$ m), e $VE_4 = 58,49$ km/h ($R_4 = 120$ m). Como $VE_1 \geq VT$, então $VE_1 = VT = 100$ km/h (admite-se que velocidade em curva não deverá ser superior à velocidade do tráfego);
- iv) Como a desaceleração termina no início da curva circular, e a aceleração inicia-se no fim da curva circular, a velocidade específica será constante em toda a extensão das curvas circulares. O mesmo não se aplica em alinhamentos retos e curvas de transição, pois vai depender da distância de transição;

- v) Com recurso à Figura 3.2, indica-se no diagrama o fim da desaceleração e o início da aceleração, ficando por definir o início da desaceleração e o fim da aceleração através do cálculo das distâncias de transição (Figura 3.5);

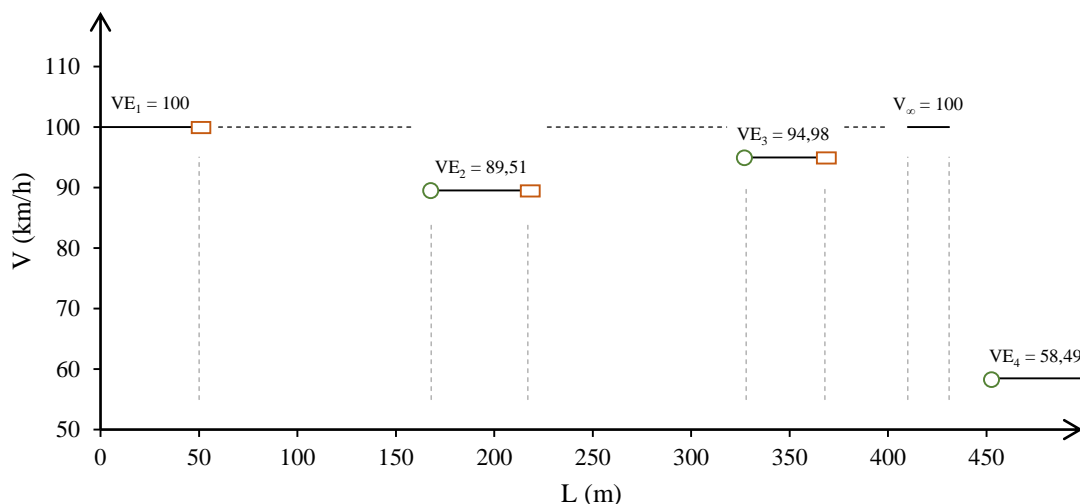


Figura 3.5 – Primeira fase da construção do diagrama de velocidades específicas

- vi) O cálculo das distâncias de transição faz-se recorrendo à equação (3.2), e considera-se o valor da aceleração e desaceleração constante e igual, em módulo, a $0,8 \text{ m/s}^2$. Para o exemplo apresentado, as distâncias de transição são as indicadas no quadro que se segue;

Quadro 3.3 – Distâncias de transição para o exemplo da Figura 3.4

Zona	Velocidades específicas (km/h)		a (m/s ²)	DT (m)
1	CT AR	CC	-0,80	$DT_1 = 95,87$
	$VE = VT = 100$	$VE_2 = 89,51$		
2	CC	CT AR	0,80	$DT_2 = 95,87$
	$VE_2 = 89,51$	$VE = VT = 100$		
3	CT AR	CC	-0,80	$DT_3 = 47,20$
	$VE = VT = 100$	$VE_3 = 94,98$		
4	CC	CT AR	0,80	$DT_4 = 47,20$
	$VE_3 = 94,98$	$VE = VT = 100$		
5	CT AR	CC	-0,80	$DT_5 = 317,27$
	$VE = VT = 100$	$VE_4 = 58,49$		

- vii) Assinalam-se as distâncias de transição determinadas anteriormente, e indicadas no Quadro 3.3, no diagrama de velocidades específicas, como se representa na Figura 3.6, e verificam-se quais as zonas perigosas;

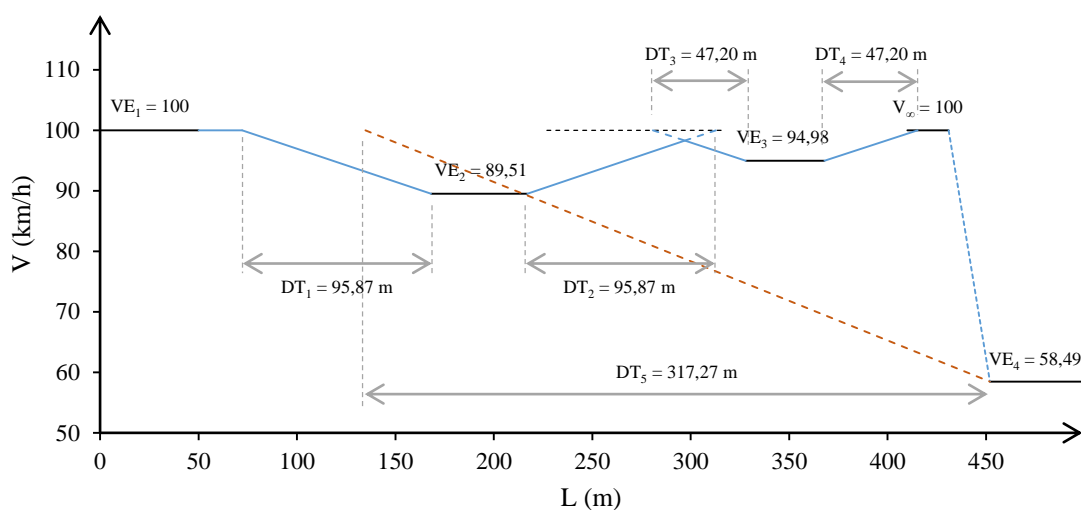


Figura 3.6 – Segunda fase da construção do diagrama de velocidades específicas

- viii) Em zonas com elementos consecutivos do tipo alinhamento reto e curva, e vice-versa, deve-se observar os diagramas *a)* e *b)* da Figura 3.3. No caso de duas curvas consecutivas, como sejam as curvas R_2 e R_3 do exemplo apresentado, o processo para determinar o desenvolvimento do diagrama de velocidades será um pouco mais complexo, e é o indicado no diagrama *c)* dessa mesma figura;
- ix) O diagrama de velocidades completamente finalizado, com indicação das eventuais zonas não homogêneas, é o representado na figura seguinte.

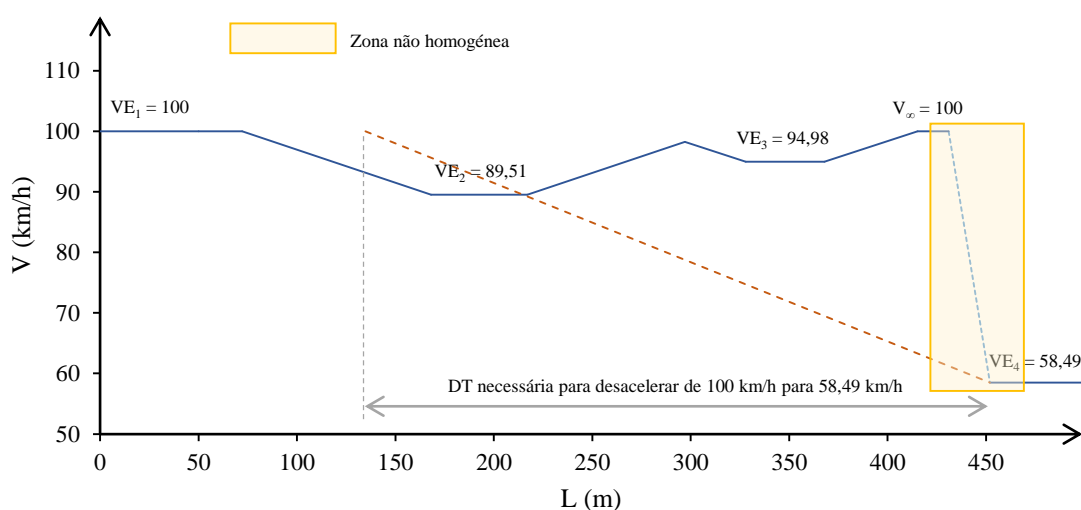


Figura 3.7 – Última fase da construção do diagrama de velocidades específicas (adaptado de JAE, 1994)

3.2.6.4 Análise do diagrama final de velocidades específicas

O diagrama final da Figura 3.7 é muito semelhante ao exemplo indicado na norma (JAE, 1994). Note-se que o alinhamento reto que sucede a curva R_3 apresenta uma extensão inferior ao limite mínimo indicado pela norma (JAE, 1994); logo, a sua velocidade não deveria ser igual à velocidade do tráfego, mas sim igual à menor das velocidades específicas das curvas que o delimitam, ou seja 58,49 km/h (como indicado no ponto *iii*) da secção 3.2.6.3). No entanto, opta-se por não proceder à sua alteração, mantendo o diagrama de acordo como é apresentado na norma. Caso isso acontecesse, continuaria a existir uma zona não homogénea (não seria possível efetuar uma aproximação à curva R_4 em segurança). Contudo, faria mais sentido que nestas situações fosse aplicado a maior das velocidades específicas das curvas que delimitam o alinhamento reto, senão vejamos: *i*) a aplicação deste limite resulta em zonas nas quais o condutor acelera para atingir a velocidade em curva e desacelera para atingir a velocidade em reta, no mínimo discutível; *ii*) a sua aplicação não respeita o pressuposto de que o início da aceleração se efetua no fim da curva e que o fim da desaceleração se efetua no início da curva. Caso se aplicasse o máximo dos valores das velocidades específicas das curvas que delimitam o alinhamento reto, apesar de, em alguns casos, resultarem saídas e aproximações em curva a uma velocidade constante, o pressuposto anterior não seria alterado.

Um outro cenário que se coloca corresponde a duas curvas com a mesma velocidade específica e com um alinhamento reto entre elas que também não respeita a extensão mínima imposta pela atual norma. Nesta situação, a velocidade seria constante ao longo dos vários elementos (curvas, reta e curvas de transição), uma vez que a distância de transição seria nula (é assumido que a velocidade específica nas curvas de transição é igual à velocidade específica em reta). No entanto, no caso da extensão do alinhamento reto ser muito próxima do mínimo (*e.g.*, $L = 350$ m para um mínimo de 420 m correspondente a uma VB de 70 km/h) e das curvas de transição que o delimitam serem relativamente extensas, considerando uma VT de 90 km/h e velocidades em curva iguais a 69,4 km/h (*e.g.*, para $R = 180$ m em ambas as curvas), para o cenário anterior, não faria sentido que o condutor adotasse a velocidade específica das curvas ao percorrer o alinhamento reto e mantivesse uma velocidade constante ao longo dos vários elementos, uma vez que era perfeitamente possível (com uma $DT = 158,6$ m) atingir a velocidade do tráfego e desacelerar em segurança até à curva seguinte. Deste modo, só em casos excecionais é recomendável a aplicação desta limitação (ver Apêndice B).

Numa análise mais detalhada por zonas, pode-se constatar que na zona um, a distância de transição indica que a desaceleração se inicia 22,13 m após o início da curva de transição, permitindo ao veículo desacelerar até ao início da curva circular seguinte em segurança. Nas zonas dois e três, o veículo nunca chega a atingir a velocidade de tráfego, sendo que a velocidade máxima é o ponto de intersecção das duas retas, *i.e.*, ponto em que se dá a transição da aceleração para a desaceleração. As distâncias de transição reais (DT_1' e DT_2') seriam determinadas como o indicado nos elementos básicos indicados na Figura 3.3. Na zona quatro, o fim da aceleração, *i.e.*, o instante em que o veículo atinge a velocidade de tráfego, é alcançada somente no desenvolvimento do alinhamento reto. A zona cinco é claramente uma zona não

homogénea, pois seria necessária uma extensão de 317,27 m para o veículo desacelerar em segurança até ao início da curva seguinte. Portanto, verifica-se que há uma diferença de velocidades inaceitável do ponto de vista da homogeneidade entre o alinhamento reto e a curva R_4 . Além disso, não é possível uma desaceleração conveniente entre a mesma curva e os elementos precedentes; deste modo, seria necessário alterar o traçado de acordo com os valores limite fixados na atual norma (JAE, 1994).

3.2.7 Considerações finais

O diagrama de velocidades específicas, como já referido e de acordo com a norma (JAE, 1994), é o principal elemento de controlo da homogeneidade do traçado de uma estrada. A sua construção permite uma análise das velocidades específicas em elementos geométricos singulares e o estudo da sua variação entre elementos consecutivos. No entanto, essa velocidade específica corresponde a uma estimativa da distribuição de velocidades de circulação não impedida cuja fundamentação se desconhece (Cardoso, 2004).

Decorrente do estudo efetuado por Moreira (2000), constata-se que quando utilizados os valores mínimos estabelecidos no traçado em planta, e desde que se verifique a limitação de raios máximos de curvas em planta para velocidades base de 60 km/h e 80 km/h como referido anteriormente, deixa de existir a necessidade de construção do diagrama de velocidades específicas. No entanto, a elaboração deste mesmo diagrama pode servir, de uma forma muito simplista, como um elemento de controlo de diversos parâmetros geométricos para novos traçados e, no caso de traçados existentes, torna-se um elemento muito útil na localização de pontos negros de traçado, *i.e.*, locais com variações bruscas e de valores elevados de velocidades específicas (Moreira, 2000). O pressuposto de que o condutor consegue percorrer a estrada à velocidade específica praticamente sem utilização dos travões, desde que sejam cumpridas as regras normativas, é um conceito puramente teórico, uma vez que a construção do diagrama só entra em linha de conta com o traçado em planta (Moreira, 2000).

Ainda de acordo com Moreira (2000), o diagrama de velocidades específicas, determinado de acordo com as regras supracitadas, no caso do estudo da homogeneidade de novos traçados é demasiado simplista, e carece de um aprofundamento e desenvolvimento de outros parâmetros que influenciam diretamente a velocidade (*e.g.*, traçado em perfil longitudinal, e perfil transversal).

Conclui-se ainda que a necessidade de aplicar a recomendação que se traduz na redução da velocidade específica dos alinhamentos retos quando estes apresentam uma extensão inferior ao mínimo recomendado pela norma em vigor, durante o cálculo do diagrama de velocidades específicas, é muito limitativa e resulta em variadas contradições dos pressupostos que servem como elementos básicos à construção desse mesmo diagrama, devendo ser aplicável apenas em casos excecionais.

3.3 Método do Instituto de Infraestruturas Rodoviárias

3.3.1 Introdução

Decorrente da necessidade de rever o conjunto de normas de projeto, nas quais se inclui a *Norma de traçado* (JAE, 1994), surge a *Revisão da norma de traçado*⁵ (InIR, 2010) elaborada pelo Instituto de Infraestruturas Rodoviárias (InIR). Esta revisão da norma apresenta, de forma distinta da atual norma (JAE, 1994), um método para avaliar a homogeneidade de traçado em estradas de faixa única, elaborado pelo LNEC (Macedo e Cardoso, 2010a), assim como equações simplificadas para a estimação da velocidade do tráfego (velocidade não impedida) em curva em função das características do traçado em planta (Macedo e Cardoso, 2010b), referidos na revisão da norma (InIR, 2010).

Os princípios básicos deste método são muito semelhantes ao método da atual norma (JAE, 1994). Já o procedimento de cálculo do diagrama de velocidades é totalmente diferente, assim como alguns pressupostos para a sua construção. Uma das finalidades deste método é o de calcular um fator de heterogeneidade para cada curva em função do aumento do risco esperado de acidente e outros parâmetros, e conseqüentemente determinar a classe de homogeneidade de cada curva; este procedimento não será abordado neste estudo e, de acordo com a revisão da norma (InIR, 2010), pode ser realizado mediante aplicação de um programa de cálculo automático desenvolvido no LNEC para o efeito, designado por “PERVEL”.

3.3.2 Princípios básicos

Este método, desenvolvido em Portugal, é utilizado para avaliação e classificação da homogeneidade de traçado de estradas interurbanas de duas vias e faixa de rodagem única, e inclui os resultados da observação do comportamento dos condutores nas estradas portuguesas e da modelação das relações entre este comportamento, as características da estrada e a frequência de acidentes (Cardoso, 2004). Baseia-se no cálculo do diagrama de velocidades médias de circulação não impedida, e apesar de, na sua formulação, dividir as estradas em duas categorias, *i.e.*, estradas com bermas não pavimentadas e estradas com bermas pavimentadas, este estudo será focado apenas na última categoria, que diz respeito sobretudo a traçados mais recentes (InIR, 2010). As hipóteses básicas adotadas para a construção do diagrama são:

- i) A velocidade de circulação não impedida escolhida pelos condutores depende, essencialmente, das características em planta dos elementos da estrada (retas ou curvas);
- ii) O processo de escolha da velocidade de circulação não impedida pelos condutores é representado por modelos de estimativa, de base empírica, em função das características do traçado em planta e em perfil longitudinal;

⁵ A revisão da norma encontra-se disponível no *site* do InIR – Instituto de Infraestruturas Rodoviárias, entretanto fundido com o IMT – Instituto da Mobilidade e dos Transportes. Enquanto norma do InIR nunca chegou a ser efetuada (Roque, 2013).

- iii) A velocidade de circulação não impedida efetivamente adotada num determinado elemento depende unicamente das características desse elemento, da velocidade adotada no elemento anterior e da velocidade a adotar no elemento seguinte;
- iv) A velocidade nos trechos curvos é constante, exceto se a velocidade de entrada for inferior à velocidade de circulação não impedida (de base empírica) desse elemento;
- v) Com exceção do caso anterior, as variações de velocidade são efetuadas nos trechos retos;
- vi) As variações de velocidade são efetuadas com uma aceleração uniforme com módulo equivalente a $0,8 \text{ m/s}^2$ (o que corresponde, no caso de redução de velocidade, à quase não aplicação dos travões e, no caso de aumento de velocidade, a uma ligeira pressão no acelerador);
- vii) A cada sentido corresponde um perfil de velocidades de circulação não impedida, dependente da evolução nesse sentido das características do traçado.

Note-se que estas hipóteses diferem em muito pouco das apresentadas no diagrama de velocidades específicas do método da JAE (1994), sendo que a maior diferença prende-se com o cálculo da velocidade não impedida (retas e curvas).

3.3.3 Descrição geral do procedimento de cálculo

Este método, como indicado anteriormente, baseia-se no cálculo do diagrama de velocidades médias de circulação não impedida (usando parâmetros de comportamento de tráfego), e a sua aplicação prática consiste na execução dos seguintes passos:

- a) Divisão da estrada em elementos retos e curvos (respetivamente retas e curvas). A definição destes elementos difere da do método da JAE (1994), e é apresentada de seguida na secção 3.3.4;
- b) Cálculo dos diagramas de velocidade média de circulação não impedida (um para cada sentido);
- c) Cálculo do fator de heterogeneidade, que pondera o risco esperado de acidente em cada curva (não é abordado nesta análise);
- d) Cálculo do valor da desaceleração na aproximação a cada curva;
- e) Determinação da classe de homogeneidade de cada curva, em função dos respetivos valores de redução de velocidade, de desaceleração e de fator de heterogeneidade (também não é abordado nesta análise).

Estes procedimentos de cálculo encontram-se presentes na revisão da norma (InIR, 2010) e o seu cálculo automático pode ser realizado por intermédio de um programa desenvolvido no LNEC para o efeito, designado por “PERVEL” (Cardoso, 2004; InIR, 2010). As velocidades não impedidas correspondentes a dois elementos consecutivos do traçado (como sejam duas curvas em planta) não devem diferir entre si de mais de 20 km/h, a fim de não se prejudicar a

homogeneidade do traçado (InIR, 2010), limitação esta também presente na norma da JAE (1994). Na análise da homogeneidade do traçado segundo este método considera-se que a velocidade do tráfego de uma reta é representada pela velocidade média de circulação livre, e pela velocidade média de circulação não impedida em curvas (InIR, 2010). De acordo com Cardoso (2004), foram também desenvolvidas equações para a estimativa do percentil 85 da distribuição das velocidades de circulação não impedida. No entanto, estas equações não se encontram presentes na revisão da norma (InIR, 2010).

3.3.4 Divisão da estrada em elementos retos e curvos

Este método impõe a prévia divisão da estrada em elementos retos e curvos. As curvas horizontais consistem num arco circular (com raio constante) ladeado por arcos de transição em cada uma das suas extremidades, definidos pela equação da curva clotóide (ver secção 2.4.3). Estes arcos de transição (ou curvas de transição) são dispensados quando as curvas circulares não necessitam de sobre-elevação, isto é, quando o raio do arco circular é superior a um valor mínimo (RS), o qual depende da velocidade base, como indicado anteriormente no Quadro 2.9 (InIR, 2010).

De acordo com a revisão da norma (InIR, 2010), a divisão da estrada em elementos retos e curvos, para efeitos de avaliação da homogeneidade de traçado, é efetuada da seguinte forma:

- Elemento curvo: trecho de estrada que compreende o arco circular e $\frac{2}{3}$ do arco de transição em cada extremidade do arco circular;
- Elemento reto: trecho de estrada que contém a zona sem curvatura horizontal e $\frac{1}{3}$ de cada um dos arcos de transição a ela contíguos.

Ou seja, o “comprimento” de um elemento curvo é calculado somando ao comprimento do trecho circular dois terços do comprimento de cada uma das suas curvas de transição; no caso de um elemento reto, este é calculado somando ao comprimento do trecho reto um terço do comprimento das curvas de transição a ele adjacentes (Cardoso, 2004).

3.3.5 Estimação da velocidade média de circulação livre (elementos retos)

Como referido anteriormente, serão apenas estudadas as estradas com bermas pavimentadas. A equação para a estimação da velocidade média de circulação livre (em reta) indicada na revisão da norma (InIR, 2010) é a seguinte:

$$V_{MR} = -28,52 - 0,047 S + 15,75 L_F + 0,0237 R_{PC} \quad (3.4)$$

onde V_{MR} é a velocidade média de circulação livre (em reta) (km/h), S é a sinuosidade média nos 500 metros antecedendo o início da reta ($^{\circ}/\text{km}$), L_F é a largura da faixa de rodagem (m), e R_{PC} é o raio da curva anterior ao início da reta (m). A sinuosidade média representa a influência

das características anteriormente encontradas pelos condutores ao longo da estrada na escolha da velocidade, e é definida como a “soma dos ângulos de deflexão da diretriz ao longo dos 500 metros anteriores ao início da reta” (InIR, 2010).

3.3.6 Estimação da velocidade de circulação não impedida (elementos curvos)

Para efeitos de aplicação em projetos de novas estradas, os valores das variáveis explicativas que constam nas equações do método em referência são suscetíveis de serem obtidos diretamente durante o cálculo do traçado, não se prevendo dificuldades na obtenção das mesmas; no caso de remodelação de estradas existentes, igual situação se verificará, uma vez que, habitualmente, é necessário o cálculo de novas diretriz e rasante. No entanto, em casos de aplicação em estradas existentes, é possível que haja alguma dificuldade em obter os valores de todas as variáveis explicativas. Neste último caso, é possível recorrer a equações simplificadas; contudo, deve ter-se atenção que tal simplificação diminuirá o rigor dos resultados da análise efetuada (InIR, 2010). Uma análise comparativa entre estas equações simplificadas e a equação relativa ao método em referência encontra-se no Apêndice C.

3.3.6.1 Estimação da velocidade não impedida em curvas (método simplificado)

De acordo com Macedo e Cardoso (2010b), são apresentadas cinco situações padrão para estradas com faixa de rodagem única, com dois sentidos, correspondendo a cada situação padrão uma equação para o cálculo da velocidade não impedida em curva (InIR, 2010; Roque, 2013). No entanto, serão apenas indicadas três equações para as situações que se enquadram neste estudo, excluindo as estradas dotadas de acessos condicionados e as estradas com bermas não pavimentadas. As equações são as seguintes:

- a) Estradas de faixa de rodagem com largura não inferior a 7,50 m;

$$VC_{85} = 119 - \frac{378,65}{\sqrt{R}} \quad (3.5)$$

- b) Estradas de faixa de rodagem com largura entre 6,00 m e 7,50 m;

$$VC_{85} = 104 - \frac{201,6}{\sqrt{R}} \quad (3.6)$$

- c) Estradas de faixa de rodagem com largura inferior a 6,00 m;

$$VC_{85} = 103 - \frac{378,65}{\sqrt{R}} \quad (3.7)$$

onde VC_{85} é a velocidade não impedida em curva (km/h), e R é o raio do arco circular da curva (m). Para obter estas equações consideraram-se elementos curvos com comprimento de 45 metros em estradas com menor largura de faixa de rodagem, e 60 metros nas restantes; relativamente à velocidade de aproximação, adotaram-se os valores de 100 km/h para as estradas com largura de faixa de rodagem não inferior a 7,50 m, de 95 km/h para as estradas com largura entre 6,00 m e 7,50 m, e de 85 km/h para as estradas com menor largura de faixa de rodagem (InIR, 2010).

3.3.6.2 Estimação da velocidade média de circulação não impedida em curvas

A equação para o cálculo da velocidade média de circulação não impedida em curva, relativa ao método em referência (InIR, 2010), considerando apenas o modelo de estradas com bermas pavimentadas, é a seguinte:

$$V_{MC} = 16,44 - \frac{158,05}{\sqrt{R}} + 2,12 L_F + 0,705 V_{MR} \quad (3.8)$$

onde V_{MC} é a velocidade média de circulação não impedida em curva (km/h), R é o raio do arco circular da curva (m), L_F é a largura da faixa de rodagem (m), e V_{MR} é a velocidade média de circulação livre na reta de aproximação à curva (km/h).

3.3.7 Limites máximos da velocidade de circulação não impedida

Os valores máximos a considerar (em elementos retos e curvos) para a velocidade média de circulação e para o percentil 85 da distribuição de velocidades de circulação, recorrendo aos resultados obtidos em estudos relativos às velocidades praticadas pelos condutores (Cardoso, 2004), para estradas com acessos não condicionados, são de 97 km/h e de 120 km/h, respetivamente (InIR, 2010).

3.3.8 Cálculo do diagrama de velocidades médias de circulação não impedida

Um dos objetivos para garantir um traçado homogéneo prende-se com a obtenção de um diagrama de velocidades uniforme (em ambas as direções) ou com ligeiras variações de velocidade entre elementos sucessivos (Cardoso, 2004). Este diagrama é o método proposto pelo InIR (2010) para avaliar a homogeneidade do traçado de estradas interurbanas de duas vias e faixa de rodagem única. Inicialmente são calculadas as velocidades teóricas (em reta e curva) em cada sentido, utilizando as equações apresentadas anteriormente. Em seguida, o diagrama de velocidades é calculado em cada elemento, em função da velocidade de entrada (velocidade de saída do elemento anterior), da velocidade teórica no elemento, do raio da curvatura, e da velocidade de saída, e considerando o valor normal da aceleração e da desaceleração. Em situações que, a montante de uma curva, não existe uma reta com extensão suficiente para

efetuar uma travagem normal deve ser adotado um valor normal para a desaceleração que compatibilize a velocidade de saída do elemento reto com a de entrada na curva (Cardoso, 2004). O cálculo do diagrama, de acordo com a revisão da norma (InIR, 2010), compreende diversos passos que se descrevem de seguida:

- a) Em função das características dos elementos (retos e curvos) são calculadas as correspondentes velocidades médias de circulação não impedida *teóricas* em cada sentido (V_{tk} na Figura 3.8), por aplicação das equações referidas previamente (secções 3.3.5 e 3.3.6), cujos valores máximos estão sujeitos aos limites referidos na secção 3.3.7. Nos *elementos curvos*, os valores assim calculados correspondem à velocidade média de circulação não impedida; excetua-se unicamente os casos das curvas referidas na alínea iv) das hipóteses básicas;

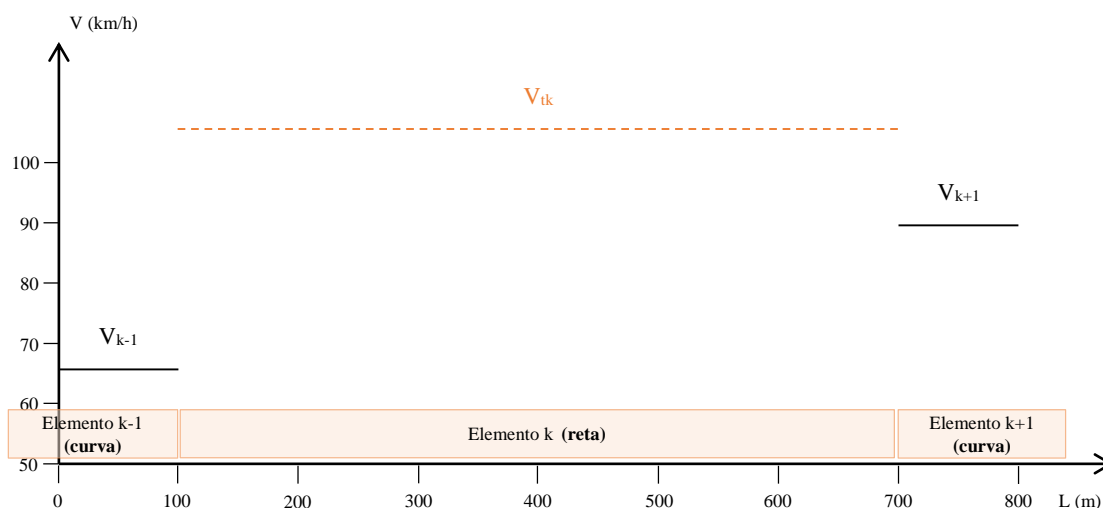


Figura 3.8 – Velocidade média de circulação não impedida teórica (V_{tk}) (adaptado de InIR, 2010)

- b) Para cada sentido é calculada a variação da velocidade média de circulação livre em cada *elemento reto* (V_k na Figura 3.9) em função da velocidade de entrada (V_{k-1} , a velocidade de saída do elemento anterior), da velocidade média de circulação não impedida *teórica* do elemento (V_{tk} , como descrito no ponto anterior), da velocidade de saída (V_{k+1} , velocidade média de circulação não impedida no elemento seguinte) e atendendo ao valor normal de aceleração ($\pm 0,8 \text{ m/s}^2$). O valor destas velocidades, nas equações que se seguem, deve ser introduzido *sempre* em km/h. Genericamente são de considerar três zonas, conforme exemplificado na Figura 3.9, correspondendo à aceleração desde V_{k-1} até V_{tk} (zona L_1), à manutenção desta velocidade (zona L_2), e à desaceleração de V_{tk} até V_{k+1} , a velocidade da curva confinante com o final do elemento reto em consideração (zona L_3). Este processo é efetuado da seguinte forma:

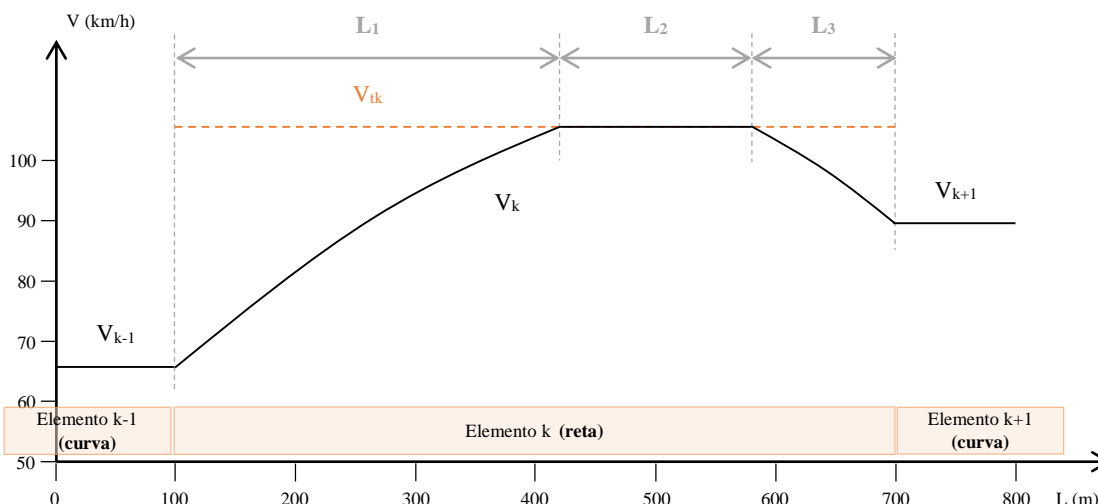


Figura 3.9 – Variação da velocidade média de circulação livre num elemento reto (k) (adaptado de InIR, 2010)

- i) Se a velocidade de entrada for inferior à velocidade média de circulação livre teórica do elemento reto ($V_{k-1} < V_{tk}$), considera-se uma zona de aumento da velocidade (designada por L_1 na Figura 3.9), e o respetivo valor é calculado de acordo com a equação seguinte:

$$V_M = \sqrt{V_{k+1}^2 + 20,736(d - d_0)} \quad (3.9)$$

onde V_M é velocidade média de circulação não impedida numa secção arbitrária da zona L_1 (km/h), d é o valor da quilometragem da secção em consideração (m), e d_0 é o valor da quilometragem da secção de início do elemento reto (m). A extensão da zona L_1 (m) é calculada através da equação seguinte:

$$L_1 = \frac{(V_{tk}^2 - V_{k-1}^2)}{20,736} \quad (3.10)$$

- ii) Uma vez atingido o valor da velocidade média de circulação livre teórica do elemento ($V_M = V_{tk}$) considera-se que a velocidade permanece constante (zona L_2 na Figura 3.9), até se verificar a necessidade de abrandamento para a velocidade da curva no final do elemento reto;
- iii) Se a velocidade de saída for inferior à velocidade média de circulação livre atingida no elemento reto ($V_{k+1} < V_M \leq V_{tk}$), considera-se uma zona de diminuição da velocidade (designada por L_3 na Figura 3.9), e o respetivo valor é calculado de acordo com a equação seguinte:

$$V_M = \sqrt{V_{tk}^2 - 20,736(d - d_1)} \quad (3.11)$$

onde V_M é a velocidade média de circulação não impedida numa secção arbitrária da zona L_3 (km/h), d é o valor da quilometragem da secção em consideração (m) e d_1 é o valor da quilometragem da secção de início da diminuição de velocidade (m). O valor da quilometragem d_1 é calculado subtraindo ao valor da quilometragem na secção final do elemento reto a extensão da zona L_3 (m), a qual resulta da equação seguinte:

$$L_3 = \frac{(V_{tk}^2 - V_{k+1}^2)}{20,736} \quad (3.12)$$

Note-se que a combinação de valores de V_{k-1} , V_{tk} , V_{k+1} e da extensão do elemento reto ($L = L_1 + L_2 + L_3$), pode determinar a não materialização de algumas das zonas referidas na Figura 3.9, podendo verificar-se casos em que ocorre: unicamente aceleração (L_1), o que poderá provocar a situação referida na alínea iv) das hipóteses básicas (*i.e.*, a variação da velocidade é também verificada no elemento curvo seguinte); só desaceleração (L_3), situação esta que poderá provocar o caso indicado no ponto c) seguinte; ou aceleração seguida de desaceleração (L_1 e L_3) sem se atingir a V_{tk} , *e.g.*, por extensão insuficiente da reta.

- c) Nos casos em que antecedendo uma curva não exista extensão de reta suficiente para efetuar uma travagem normal é adotado um valor para a desaceleração que compatibilize a velocidade máxima no elemento reto com a de entrada na curva (Figura 3.10).

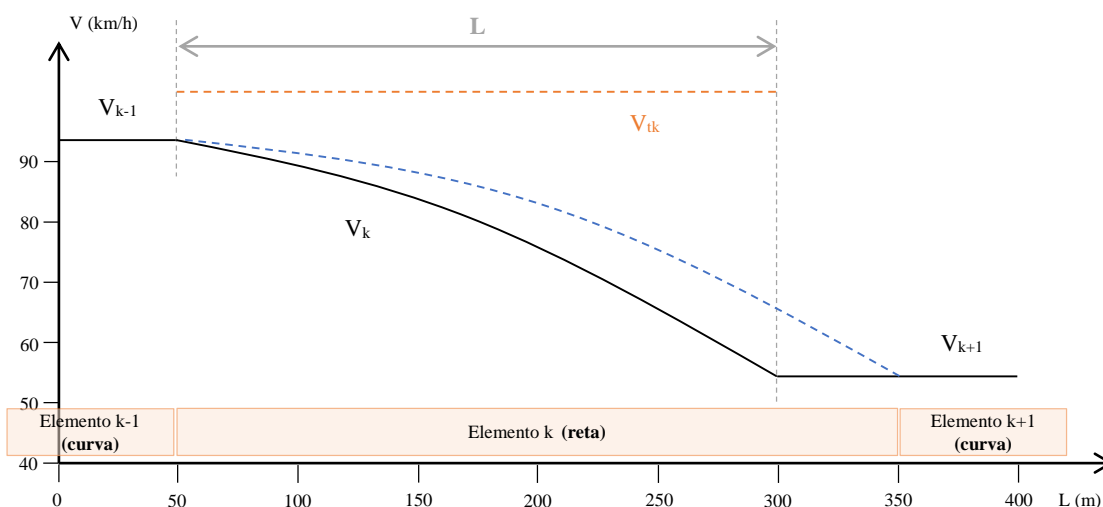


Figura 3.10 – Variação da velocidade média de circulação livre num elemento reto (k) cujo comprimento não é compatível com a desaceleração normal (adaptado de InIR, 2010)

Situações deste tipo verificam-se sempre que a extensão do elemento reto L seja inferior ao valor mínimo L_{\min} (m) calculado com a equação seguinte:

$$L_{\min} = \frac{|V_{k-1}^2 - V_{k+1}^2|}{20,736} \quad (3.13)$$

O valor da aceleração a considerar é calculado pela equação seguinte:

$$a = \frac{(V_{k+1}^2 - V_{k-1}^2)}{25,92 L} \quad (3.14)$$

onde a é o valor da aceleração (m/s^2), e L é a extensão do elemento reto (m). Esta equação foi também usada na secção 3.2.5 para calcular o valor exato da aceleração (ou desaceleração), aqui apresentada de forma diferente. Para o cálculo da variação da velocidade ao longo de um elemento reto deste tipo usa-se a equação seguinte:

$$V_M = \sqrt{V_{k-1}^2 - 25,92 a (d - d_0)} \quad (3.15)$$

onde V_M é a velocidade média de circulação livre numa secção arbitrária do elemento reto (km/h), a é o valor da aceleração calculada pela expressão anterior (m/s^2), d_0 é o valor da quilometragem da secção de início do elemento reto (m), e d é o valor da quilometragem da secção em consideração (m).

3.3.9 Cálculo do valor da desaceleração na aproximação a uma curva

Os procedimentos descritos para o cálculo dos perfis de velocidades não impedidas (um para cada sentido de trânsito) são aplicáveis aos casos do projeto de estradas novas e remodelação de estradas existentes. No entanto, em diversas estradas existentes é frequente existirem retas cujo comprimento é insuficiente para permitir a redução necessária de velocidade na aproximação da curva seguinte, admitindo a aceleração normal de $-0,8 \text{ m/s}^2$; nestes casos, considera-se que a aceleração se fará com maior intensidade do que a normal e o valor exato é calculado em função do diferencial de velocidades (na curva e na reta antecedente) e da distância entre o ponto de velocidade máxima em reta e o início da curva. Este cálculo pode ser efetuado mediante a utilização da equação (3.2) presente na secção 3.2.5, ou da equação (3.14) indicada na secção anterior. Esta desaceleração deve ser, preferencialmente, em valor absoluto, inferior a $2,0 \text{ m/s}^2$ (InIR, 2010).

3.3.10 Considerações finais

Este método encontra-se devidamente fundamentado, ao contrário do método apresentado na atual norma (JAE, 1994), e aborda de forma objetiva a homogeneidade do traçado de estradas interurbanas de duas vias e faixa de rodagem única. No entanto, é uma metodologia que engloba várias hipóteses de cálculo e que, sem a ajuda do referido programa de cálculo automático desenvolvido pelo LNEC, se torna num processo moroso e complexo, e também devido à necessidade de requerer um conjunto selecionado de características geométricas, muitas das vezes, em casos de estradas já existentes, difíceis de quantificar. Fica ainda por explicar como se processa o cálculo do diagrama de velocidades no caso de duas ou mais curvas sucessivas (*i.e.*, sem qualquer alinhamento reto entre elas), uma vez que o método só faz referência ao cálculo da sequência curva-reta-curva.

Fazendo um paralelismo com o método proposto pela atual norma (JAE, 1994) para a situação de duas ou mais curvas sucessivas, a variação de velocidades (aceleração e desaceleração) ocorre nas curvas de transição, assumindo que nas curvas de transição a velocidade corresponde à velocidade do tráfego. Contudo, como o método proposto pelo InIR (2010) pressupõe a divisão da estrada em elementos retos e curvos, em que estes últimos correspondem à extensão da curva circular somando $\frac{2}{3}$ da extensão de cada curva de transição, a zona de variação da velocidade seria apenas efetuada nos restantes $\frac{1}{3}$ de cada curva de transição (no caso de uma sequência curva-curva), pois nos elementos curvos a velocidade é considerada constante (com a devida exceção já referida).

É compreensível que a análise seja efetuada apenas na transição de um elemento reto para uma curva, pois essas são as secções mais críticas no que diz respeito à segurança de circulação numa estrada.

3.4 Método desenvolvido no âmbito do projeto SAFESPEED

3.4.1 Introdução

Este método apresenta um modelo de estimação da velocidade livre de circulação desenvolvido para estradas portuguesas de duas vias, de acordo com o estudo elaborado por Lobo *et al.* (2013), no âmbito do projeto de investigação SAFESPEED (Estratégias de gestão da velocidade: um instrumento para a implementação de soluções de gestão rodoviária seguras e eficientes). Note-se que a definição de velocidade livre de circulação (*free-flow speed*, FFS) preconizada pelo HCM (TRB, 2010) é similar à definição de velocidade operacional (*operating speed* na terminologia anglo-saxónica) contemplada pela AASHTO (2011), sendo esta última frequentemente estimada pelo percentil 85 da distribuição de velocidades. Este modelo adota uma formulação exponencial e é aplicável a retas e curvas, englobando não só as características do elemento em consideração, mas também do respetivo troço a montante e do campo de visão para jusante. Além disso, poderá ser utilizado como ferramenta para a avaliação da homogeneidade do traçado, em alternativa ao procedimento contido na norma da JAE (1994).

3.4.2 Descrição do modelo e princípios básicos

O modelo permite a estimação da *FFS* num dado elemento da diretriz (reta ou curva) através de uma função exponencial das características da estrada, como se indica na expressão seguinte:

$$FFS = f(X_e, X_m, X_j) = \beta_0 e^{(\beta_1 \cdot X_e)} e^{(\beta_2 \cdot X_m)} e^{(\beta_3 \cdot X_j)} \quad (3.16)$$

onde X_e corresponde às características do elemento, X_m e X_j representam as características do troço a montante e a jusante, respetivamente, e $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ são coeficientes de regressão. Uma das principais vantagens da forma exponencial face à linear consiste na interação entre os efeitos produzidos pelas características da estrada e a ordem de grandeza das velocidades praticadas, resultando provavelmente numa utilização mais adequada à modelação de velocidades em países europeus. Os conjuntos de variáveis X_e, X_m e X_j representam as características geométricas e do atrito lateral da estrada com influência nas velocidades praticadas pelos condutores, sendo que: X_e caracteriza a reta ou curva e pode incluir vários fatores, *i.e.*, o raio, a extensão, a inclinação longitudinal, e as larguras da via e berma; X_m descreve as características do troço a montante, como seja a densidade de interseções; X_j representa as características a jusante do elemento com influência no comportamento dos condutores e contempla tipicamente a distância de visibilidade. Assim, o modelo proposto traduz a ideia de que o comportamento do condutor, quando este descreve uma reta ou curva, não depende apenas das características desse elemento, mas também da experiência recente de condução e do que ele consegue visualizar a jusante da sua posição (Lobo *et al.*, 2013).

O modelo foi desenvolvido a partir de dados recolhidos em vários troços de estradas nacionais situados fora de áreas urbanas. Foi assumido o percentil 85 da distribuição de velocidades dos veículos que circulam em regime livre como sendo a *FFS* associada a uma determinada reta ou curva; sempre que um veículo circula com um intervalo temporal de, no mínimo, seis segundos relativamente ao veículo precedente, é estabelecido o regime livre de circulação, conforme proposto por Lobo *et al.* (2011) (referido por Lobo *et al.*, 2013). Por forma a utilizar o mesmo modelo matemático para o cálculo da *FFS* em retas e curvas, é introduzida uma variável *dummy* para curvas, que assume um valor unitário no caso de se tratar de tal elemento, ou o valor zero no caso de ser uma reta. Os valores considerados para a inclinação longitudinal e para as características do perfil transversal são representativos da totalidade do elemento em causa. A largura pavimentada traduz a soma da largura da via e da berma, e foi recolhida por sentido de circulação. No que concerne à desobstrução lateral adicional, esta diz respeito à distância entre o limite exterior da berma e qualquer objeto fixo à margem da estrada. A sinuosidade é representada pelo somatório dos ângulos de deflexão por quilómetro (considerando troços a montante com uma extensão fixa de um quilómetro), e as densidades de interseções e de construção marginal traduzem o número por quilómetro de interseções com outras estradas públicas e de edifícios construídos à margem da estrada, respetivamente. Os efeitos causados pelo troço a jusante são incluídos através de uma única variável *dummy* representativa do campo

de visão do condutor quando este circula no elemento em análise. Esta variável *dummy* assume um valor unitário se o condutor descreve uma curva de raio igual ou inferior ao mínimo absoluto (ver secção 2.4.2.3) ou se existe tal curva dentro da distância de visibilidade de decisão (ver secção 3.2.5.2), ou assume o valor zero no caso contrário (Lobo *et al.*, 2013).

Os resultados da regressão exponencial múltipla revelam que o facto de um condutor circular num elemento curvo é, de todos os outros fatores, o mais importante para a sua escolha de velocidade; este comportamento corresponde às expectativas, dado que as curvas com raios muito elevados não são comuns em estradas portuguesas de duas vias. O aumento do atrito lateral e a diminuição da qualidade geométrica dos troços adjacentes causam reduções na *FFS* praticada numa determinada reta ou curva, que são, contudo, de menor importância face às características do elemento (Lobo *et al.*, 2013).

3.4.3 Equação para a estimação da velocidade livre de circulação

Por não se revelarem estatisticamente significativas, as variáveis “inclinação longitudinal” e “densidade de construção marginal” foram removidas do modelo. A falta de significância estatística da inclinação longitudinal pode estar relacionada com os valores relativamente baixos observados no local (valor médio de 3%), sendo que, por este motivo, os autores (Lobo *et al.*, 2013) não recomendam a aplicação deste modelo a estradas construídas em terreno montanhoso. O modelo de estimação da *FFS* proposto para estradas portuguesas de duas vias é indicado na equação seguinte:

$$FFS = e^{[3,999-0,626C+0,118\ln(R)+0,065\ln(E)+0,058\ln(L_P)+0,009\ln(DLA)-0,019\ln(S)-0,036\ln(DI)-0,043VL]} \quad (3.17)$$

onde *FFS* é a velocidade de circulação em regime livre (km/h), *C* é a variável *dummy* para curvas, *R* é o raio da curva (m), *E* é a extensão do elemento (m), *L_P* é a largura pavimentada (m), *DLA* é a desobstrução lateral adicional (m), *S* é a sinuosidade do troço a montante (°/km), *DI* é a densidade de interseções (n.º/km), e *VL* é a variável *dummy* para visibilidade limitada; note-se que *DLA*, *S*, *DI* > 0.

3.4.4 Considerações finais

De acordo com Lobo *et al.* (2013), os resultados obtidos permitem verificar que a curvatura horizontal exerce uma influência primordial nas velocidades praticadas pelos condutores, não sendo contudo negligenciáveis os efeitos produzidos por fatores tais como a largura do perfil transversal, a densidade de interseções e a visibilidade para jusante. A sinuosidade e o atrito lateral revelaram também alguns efeitos significativos na velocidade, sendo contudo inferiores aos causados pelas características do elemento. O modelo aqui reproduzido revela duas características distintas no conjunto dos modelos desenvolvidos até ao momento: *i*) considera não só as características do elemento, como também dos troços a montante e a jusante; *ii*) recorre a uma regressão exponencial, em detrimento da mais comum forma linear. Estas duas

características vão ao encontro de algumas das lacunas presentes no estado da arte da modelação de velocidades indicadas pelo TRB (2011), nomeadamente no que se refere à escassa existência de modelos para retas e às limitações do uso da regressão linear (Lobo *et al.*, 2013).

Este modelo revelou que algumas das variáveis incluídas produzem diferenças relevantes quando comparado com outros modelos, como é o caso do modelo proposto pelo HCM (TRB, 2010). Neste sentido, os autores (Lobo *et al.*, 2013) recomendam precaução sempre que o modelo seja aplicado fora do contexto português.

3.5 Método do Highway Engineering Research Group

3.5.1 Introdução

Camacho-Torregrosa *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de avaliação da homogeneidade do traçado que poderá ser utilizado como um método alternativo para avaliar a segurança em estradas rurais de duas vias. O estudo foi conduzido em Espanha e para esse efeito foram utilizados dados recolhidos de vários segmentos de estrada. O parâmetro de avaliação da homogeneidade do traçado é baseado em modelos de velocidade operacional contínuos desenvolvidos em estudos anteriores por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010) através de uma técnica inovadora que utiliza um equipamento de GPS colocado no veículo de vários condutores, resultando em dois modelos de estimação da velocidade operacional: um para curvas horizontais, e outro para retas. O perfil definitivo de velocidades foi então construído de acordo com regras específicas, e utilizou dois outros modelos, um de desaceleração e outro de aceleração. O cálculo da desaceleração foi obtido recorrendo ao modelo desenvolvido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2011), e o modelo de cálculo da aceleração, usando a mesma metodologia que o anterior, foi desenvolvido pelos autores do método aqui descrito (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013).

3.5.2 Descrição do modelo e princípios básicos

O modelo de homogeneidade apresentado pelos autores (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013) foi calibrado de acordo com o número de acidentes que se verificaram nas estradas analisadas. Inicialmente, o traçado horizontal e as características geométricas dessas estradas foram obtidos usando o mesmo procedimento usado no estudo desenvolvido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), e posteriormente calculados os perfis de velocidade de acordo com os modelos de estimação da velocidade operacional indicados nas secções seguintes. Estes perfis de velocidade foram calculados para ambas as direções, e vários parâmetros foram obtidos e relacionados com o comportamento dos condutores. Dos vários parâmetros analisados por Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), destacam-se a velocidade operacional média (\bar{v}_{85}) e o desvio padrão das velocidades operacionais (σ_{85}). O valor médio da velocidade foi determinado como um indicador global da velocidade operacional ao longo da estrada, e o desvio padrão foi necessário para determinar a dispersão total da velocidade operacional. Esta dispersão seria maior, quanto maior a

inconsistência expectável do traçado. O cálculo foi efetuado com a precisão de um metro, em cada direção, não considerando individualmente cada elemento geométrico do segmento de estrada. A partir dos perfis de velocidade calculados e da velocidade média foram obtidos vários indicadores, como por exemplo:

- R_a : apresentado por Polus e Mattar-Habib (2004), este indicador mede a área delimitada pelo perfil da velocidade operacional e a velocidade operacional média em cada segmento de estrada, dividida pela extensão total. Logo, é um indicador da variabilidade global da velocidade, apresentando valores elevados sempre que a variabilidade da velocidade aumenta;
- $E_{a,10}$: este indicador é também uma medida da dispersão da velocidade. Da mesma forma que a medida anterior, representa a área delimitada pelo perfil da velocidade operacional e a velocidade operacional média ± 10 km/h, sendo também dividida pela extensão total do segmento de estrada;
- $E_{a,20}$: este indicador é semelhante ao anterior, mas considerando ± 20 km/h.

Foram também identificadas e analisadas as transições onde se verificava o decréscimo da velocidade para todos os segmentos, e calculados o diferencial de velocidades em valor absoluto (ΔV_{85}) e a distância onde se verificava a variação dessas mesmas velocidades. Vários parâmetros foram também obtidos nesta análise, destacando-se a redução média da velocidade operacional, denotada por $\overline{\Delta V}_{85}$. Este parâmetro corresponde ao valor médio de todas as reduções de velocidade efetuadas em cada segmento de estrada; é expectável que a estrada seja mais inconsistente quanto maior seja o valor deste parâmetro, devido a reduções de velocidade maiores. Ainda de acordo com Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), este último parâmetro e o desvio padrão das velocidades operacionais (σ_{85}) apresentaram uma alta correlação entre eles, ou seja reduções de velocidade elevadas normalmente representam elevada variabilidade. Outros parâmetros que revelaram uma alta correlação entre eles foram a velocidade operacional média (\overline{v}_{85}) e o indicador R_a que, de acordo com a definição apresentada anteriormente, representa a variabilidade da velocidade ao longo de um troço de estrada. A hipótese apresentada pelos autores (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013) é que em trechos de estrada constituídos por curvas apertadas e pequenas retas, os condutores ficam limitados à geometria do traçado e não conseguem atingir a velocidade desejada, o que normalmente resulta em velocidades operacionais reduzidas e pequenas dispersões de velocidade. Assim, nestes casos, a variável R_a , que mede a variabilidade da velocidade, apresenta um valor reduzido. Em troços de estrada onde a geometria não limita os condutores, as velocidades operacionais praticadas são superiores, resultando numa variabilidade da velocidade reduzida e, portanto, em valores de R_a também eles reduzidos. Então, os valores máximos de R_a são atingidos quando as velocidades operacionais apresentam um valor médio (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013).

Considerando as variáveis indicadas anteriormente, e outras referidas pelos autores (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013), as que apresentaram uma maior interdependência com a percentagem

estimada de acidente (*estimated crash rate*, ECR) foram R_a , \bar{v}_{85} , e $\overline{\Delta V}_{85}$. Assim, o indicador de consistência desenvolvido, e que será indicado na secção 3.5.6, foi determinado pela divisão da velocidade operacional média ao quadrado e o valor da redução média de velocidade.

3.5.3 Equações para a estimação da velocidade operacional em curvas

O modelo de estimação da velocidade operacional em curvas apresenta a vantagem de ter sido desenvolvido com o recurso a perfis de velocidades contínuos de condutores individuais através de um equipamento de GPS, que permitiu a determinação exata das velocidades máxima e mínima efetivamente praticas pelos condutores em diferentes elementos geométricos do traçado. Este modelo, desenvolvido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), utiliza o raio como variável explicativa, e duas equações foram desenvolvidas: uma para raios superiores a 400 m (com um raio máximo de 950 m), e com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,76 correspondente à equação (3.18), e outra para raios inferiores ou iguais a 400 m (com um raio mínimo de 70 m), e com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,84 correspondente à equação (3.19). As equações, como indicadas por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), são as seguintes:

$$V_{85} = 97,4254 - \frac{3310,94}{R}; \quad 400 \text{ m} < R \leq 950 \text{ m} \quad (3.18)$$

$$V_{85} = 102,048 - \frac{3990,26}{R}; \quad 70 \text{ m} < R \leq 400 \text{ m} \quad (3.19)$$

onde V_{85} é a velocidade operacional na curva (km/h), e R é o raio (m).

3.5.4 Equação para a estimação da velocidade operacional em retas

De acordo com Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), um modelo de estimação da velocidade operacional em retas foi também desenvolvido, considerando a extensão da reta e a velocidade operacional da curva anterior como variáveis explicativas. Foi notado que todos os condutores tinham a tendência em atingir uma velocidade desejada de 110 km/h. No entanto, dependendo da extensão da reta, os condutores podiam acelerar ou desacelerar, partindo da velocidade operacional da curva anterior. Desse modo, quanto maior fosse a extensão das retas, mais a velocidade operacional se aproximava da velocidade desejada pelos condutores. A equação desenvolvida por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), que apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,52, é a seguinte:

$$V_{85T} = V_{85C} + (1 - e^{-\lambda \cdot L}) \cdot (V_{des} - V_{85C}) \quad (3.20)$$

$$\lambda = 0,00135 + (R - 100) \cdot 7,00625 \cdot 10^{-6} \quad (3.21)$$

onde V_{85T} é a velocidade operacional em reta (km/h), V_{85C} é a velocidade operacional na curva anterior, obtida pelas equações da secção 3.5.3 (km/h), λ é o parâmetro de calibração do erro quadrático médio (*mean squared error*, MSE) calculado pela equação (3.21), L é a extensão da reta (m), V_{des} é a velocidade desejada (km/h), ou seja a velocidade escolhida pelos condutores quando percorrem a reta em condições de circulação livre, que neste método foi assumida como tendo um valor constante correspondente a 110 km/h, e R é o raio da curva circular (m).

3.5.5 Equações para o cálculo da desaceleração e aceleração

Como referido anteriormente, o cálculo da desaceleração é efetuado neste método de acordo com o modelo obtido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2011), e o cálculo da aceleração é realizado de acordo com o modelo obtido por Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), usando a mesma metodologia que os autores anteriores. A maioria dos modelos de velocidade operacional atuais indicam valores constantes de desaceleração e aceleração, independentemente das características da curva contígua. Neste caso, os dois modelos apresentados (aceleração e desaceleração) dependem do raio da curva adjacente. Em ambas as equações, o raio da curva precedente (aceleração) e curva subsequente (desaceleração) é considerado. As equações são as seguintes:

$$d_{85} = 0,313 + \frac{114,436}{R} \quad (3.22)$$

$$a_{85} = 0,417 + \frac{65,936}{R} \quad (3.23)$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), a_{85} é a aceleração (m/s^2), e R é o raio da curva contígua (m). Estas equações de desaceleração e aceleração foram obtidas considerando cada condutor individualmente e selecionando os pontos específicos onde a variação da velocidade se iniciava e terminava, em vez de considerar a mesma transição de velocidade para todos os condutores. Deste modo, de acordo com Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), os valores da desaceleração e aceleração refletem de uma melhor forma o comportamento dos condutores.

3.5.6 Indicador da consistência do traçado

Como referido previamente, e de acordo com Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), a maior interdependência verificada em relação ao *ECR* foi aquela determinada pela divisão da velocidade operacional média ao quadrado e o valor da redução média de velocidade. Então, o modelo proposto para o indicador da consistência do traçado é o seguinte:

$$C = \frac{V_{85}^2}{\Delta V_{85}} \quad (3.24)$$

onde C é o índice de consistência do traçado (km/h), \bar{v}_{85} é a velocidade operacional média (km/h), e $\overline{\Delta V}_{85}$ é a redução média da velocidade operacional. Esta equação indica que em troços de estrada que apresentem reduzidos valores da redução média da velocidade ($\overline{\Delta V}_{85}$) resultam elevados valores de consistência, devido a uma velocidade mais homogénea. Valores elevados da velocidade operacional média (\bar{v}_{85}) estão associados com estradas mais consistentes, para os mesmos valores da redução média da velocidade. É importante referir que este modelo considera a velocidade média e também a sua variabilidade, ao contrário de outros modelos que apenas consideram a desaceleração, representada nesses modelos pelo desvio padrão das velocidades operacionais (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013). Assim, quanto maior for o valor do parâmetro de consistência C neste modelo, mais homogénea é essa estrada.

3.5.7 Considerações finais

Este modelo poderá ser usado como uma medida alternativa para avaliar a segurança e homogeneidade do traçado em estradas rurais de duas vias. As variáveis consideradas no modelo foram relacionadas com a velocidade operacional e também com o comportamento dos condutores relativamente à desaceleração nos vários segmentos de estrada analisados. Estas variáveis foram obtidas dos perfis de velocidade operacional elaborados usando os modelos de estimação da velocidade e de desaceleração e aceleração, desenvolvidos em estudos anteriores. Foi proposto um modelo que relaciona os acidentes com a geometria da estrada (que não foi referido nesta análise), e desse modelo resulta o índice de consistência referido, que proporciona uma nova medida para avaliar a homogeneidade do traçado para a totalidade de um troço de estrada (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013). No entanto, é necessário estabelecer, para este método, limites de consistência à semelhança de outros critérios referidos anteriormente (Lamm *et al.*, 1999; Polus e Mattar-Habib, 2004).

3.6 Outros modelos existentes na literatura

Existem ainda outros modelos de estimação de velocidades desenvolvidos por diversos autores, bem como a metodologia de estimação da *FFS* em estradas de duas vias proposta pelo HCM (TRB, 2010). Os efeitos da diretriz nas velocidades adotadas pelos condutores têm sido amplamente estudados, sendo aquela frequentemente apontada como o principal fator de influência (Lobo *et al.*, 2013). Estes modelos normalmente representam funções lineares do raio, da curvatura ($1/R$), do grau de curvatura (DC) ou de outras variáveis relacionadas, *e.g.*, Morrall e Talarico (1994), Misaghi e Hassan (2005), Passetti e Fambro (1999), Fitzpatrick *et al.* (2000b). Outros autores, como é o caso de Pratt e Bonneson (2009), desenvolveram um modelo de estimação de velocidades tendo por base os conceitos de atrito lateral e energia cinética durante a sua investigação em curvas de estradas rurais de duas vias. Este modelo resultou em duas equações, uma para estimação da velocidade em reta e outra para a estimação da velocidade em curva. Esta última é função do raio, do ângulo de deflexão da curva e da “viragem lateral máxima” do veículo (*maximum lateral shift* na terminologia anglo-saxónica),

fenómeno este que de acordo com a AASHTO (2011) ocorre como resultado do comportamento em curva da maioria dos condutores e tem um valor recomendado de 1,0 metros. Este modelo impõe que a velocidade em curva seja sempre inferior à velocidade de aproximação em reta.

Estes modelos são apresentados no Apêndice D. São também indicados alguns modelos de estimação da desaceleração e aceleração em curva com o raio e o inverso do raio (curvatura) como variável explicativa. Os modelos que constam do referido apêndice foram selecionados por serem aqueles que normalmente se apresentam como modelos de referência em variados documentos, por utilizarem apenas o raio, ou transformações deste, *e.g.*, o inverso do raio e a raiz quadrada do raio, como variáveis explicativas, bem como modelos desenvolvidos em países com estradas que apresentam características semelhantes às das estradas portuguesas.

3.7 Limitações dos modelos de estimação de velocidade existentes

Relativamente às questões que se apresentam durante a fase de recolha de dados, Hassan (2004) afirma que o tamanho da amostra usado no desenvolvimento do modelo em termos de número de locais e observações por local é um ponto relevante quando se questiona a validação de um modelo de estimação de velocidade operacional. Misaghi e Hassan (2005) indicam que, dado o número de observações em cada curva variar entre 30 e 100, a precisão desta pequena amostra em representar a velocidade correspondente ao percentil 85 (*i.e.*, velocidade operacional) no local é questionável. Em alguns estudos, a recolha de dados é efetuada apenas em locais escolhidos de acordo com determinados critérios. Fitzpatrick e Collins (2000) referem que uma das vantagens deste tipo de abordagem traduz-se numa maior confiança em determinar quais os parâmetros que mais afetam a velocidade ao longo de uma estrada. No entanto, uma desvantagem ocorre quando se procura determinar as velocidades ao longo de um complexo alinhamento que inclui curvas que não se ajustam aos critérios utilizados no desenvolvimento do modelo (TRB, 2011).

No que respeita ao comportamento do condutor, muitos modelos assumem que a aceleração e a desaceleração ocorre apenas nos alinhamentos retos, *i.e.*, a velocidade é constante ao longo da curva. Nie e Hassan (2007) (referido por TRB, 2011) indicam que alguns modelos existentes são desenvolvidos baseando-se em premissas que podem não ser realistas. Por exemplo, os perfis de velocidade sugeridos por Leisch e Leisch (1977) presumem que a aceleração e desaceleração ocorrem apenas na reta, e que uma velocidade constante é mantida na curva. Os estudos de Ottesen e Krammes (2000) e Fitzpatrick e Collins (2000) sugerem o mesmo. Misaghi e Hassan (2005) notaram, quando efetuaram o estudo que considerava a redução de velocidade em termos de ΔV_{85} , que a tendência de ajustar a velocidade na curva horizontal contradiz a premissa que os condutores mantêm uma velocidade constante na curva. Fitzpatrick e Collins (2000) também fundamentaram que a aceleração e a desaceleração são usualmente observadas nos limites da curva, onde o modelo do perfil de velocidades assume que qualquer aceleração e desaceleração tomam lugar antes e depois da curva horizontal (TRB, 2011).

Uma das dificuldades na estimação da diferença de velocidades entre elementos geométricos prende-se com o cálculo do diferencial de velocidades na transição de um elemento reto para uma curva, usando o percentil 85 da distribuição de velocidades. O cálculo deste diferencial de velocidades desde a reta de aproximação até à curva é um dos métodos principais para avaliar a homogeneidade do traçado. Este método é usado na maioria dos modelos existentes, *e.g.*, Lamm *et al.* (1988), Krammes *et al.* (1995), Fitzpatrick e Collins (2000), assumindo que a distribuição de velocidades em elementos sucessivos do traçado é a mesma (TRB, 2011). De acordo com Misaghi e Hassan (2005), a metodologia usada normalmente para o cálculo do diferencial de velocidades é baseada no cálculo da velocidade operacional dos condutores no elemento curvo e no elemento reto, e da subtração destes dois valores resulta o valor do diferencial de velocidades; no entanto, como se considera que a distribuição de velocidades é a mesma no elemento curvo e no elemento reto, esta metodologia não é necessariamente correta. Portanto, novos parâmetros foram introduzidos baseados na redução de velocidade dos condutores, analisados individualmente, como é o caso de $\Delta_{85}V$ que corresponde à redução de velocidade correspondente ao percentil 85 para condutores individualizados baseada em dados recolhidos em dois pontos na reta de aproximação e no ponto médio da curva (TRB, 2011). Um exemplo desta metodologia encontra-se no Apêndice D. Uma importante lacuna, enunciada por Nie e Hassan (2007), é não existir, até à data da sua investigação, qualquer modelo que permita a quantificação do acréscimo de velocidade quando um condutor parte de uma curva circular (TRB, 2011).

Uma outra limitação no processo de estimação da velocidade operacional é que, relativamente aos modelos de estimação da velocidade em curva, existem poucos para o cálculo da velocidade em reta. Muitos modelos optam por não incluir um modelo para retas, ou então calculam apenas uma “velocidade desejada”, *e.g.*, Krammes *et al.* (1995). Outros estudos, mais recentes, *e.g.*, Gibreel *et al.* (2001), Nie e Hassan (2007), apresentam um modelo para este cálculo, mas com algumas lacunas (TRB, 2011). Polus *et al.* (2000) indicam que este cálculo é um maior desafio que o cálculo em curva, pois o número de variáveis que influenciam a velocidade em reta é maior que aquelas que influenciam a velocidade em curva, tornando assim este cálculo da velocidade operacional em reta relativamente complexo. Em elementos retos de estradas rurais de duas vias, a velocidade dos veículos depende de uma vasta lista de características, como a extensão da reta, o raio da curva anterior e subsequente, características do perfil transversal e longitudinal, características do terreno, e distância de visibilidade. Adicionalmente, a velocidade operacional em reta depende muito da atitude do condutor, assim como da aceleração e desaceleração do veículo numa determinada estrada. Fitzpatrick e Collins (2000) concluíram que é necessário investigar ainda mais a influência que os parâmetros “extensão” e “inclinação longitudinal” provocam na velocidade efetivamente praticada pelos condutores em reta (TRB, 2011).

4 Recolha e tratamento dos dados de campo

4.1 Introdução

O objetivo deste estudo, numa fase inicial, é desenvolver um modelo que utilize características geométricas do alinhamento como variáveis explicativas de forma a prever a velocidade operacional em estradas de duas vias e faixa de rodagem única, e conseqüentemente, numa fase posterior, avaliar a homogeneidade do traçado. O método deverá incluir a avaliação da variação de velocidades na transição de um elemento reto para um elemento curvo, e múltiplas variáveis foram estudadas, *e.g.*, a velocidade no interior da curva, a extensão da desaceleração e da aceleração, e a variação da velocidade na transição de um elemento reto para um elemento curvo.

Esta análise não é baseada em dados recolhidos pontualmente com recurso a equipamentos de medição de velocidade colocados em vários locais do traçado, como verificado em outros estudos, mas sim numa recolha contínua de dados ao longo do tempo e do traçado. Conseqüentemente, o modelo e os resultados obtidos poderão tornar-se mais exatos que os anteriores, caso se trate de uma amostra semelhante. Portanto, este estudo não só explica os resultados e modelo obtidos, mas também avalia uma metodologia de recolha e análise de dados contínuos de velocidades praticadas pelos condutores.

A maioria dos estudos e modelos descritos anteriormente, assim como o presente estudo e o modelo que será desenvolvido numa fase posterior, são resultado de observações de velocidades em ambiente real. Desse modo, sempre que se utiliza a designação de velocidade de uma forma indistinta, está-se a fazer referência à velocidade operacional, ou velocidade do tráfego.

A maioria dos modelos de estimação da velocidade são baseados em dados pontualmente, recolhidos em secção, assumindo uma velocidade constante nas curvas e, portanto, a desaceleração ocorre inteiramente na reta de aproximação. Com base nestes pressupostos, os dados nestes modelos são recolhidos nos pontos médios da curva e da reta de aproximação, sendo utilizados posteriormente para desenvolver os modelos de velocidade operacional. Este estudo apoia-se numa metodologia diferente, baseada na recolha de dados de uma forma contínua com recurso a um equipamento de GPS. Desse modo, os modelos desenvolvidos serão mais exatos que os referidos anteriormente, e os pressupostos indicados poderão ser analisados com maior detalhe.

Os perfis de velocidade contínuos permitem estudar o comportamento do condutor, designadamente a variação da sua velocidade ao longo dos diferentes elementos do traçado e os seus pontos de transição, fenómenos que não poderiam ser compreendidos anteriormente, especialmente no que se relaciona com a desaceleração e com as variações de velocidade.

Nas secções seguintes são abordadas as metodologias usadas neste estudo para a recolha dos dados de campo, assim como o método escolhido para o tratamento e redução dos dados, sendo que este último ponto será aprofundado no capítulo seguinte.

4.2 Metodologias usadas em outros estudos

A segurança de uma estrada depende de vários fatores, e a homogeneidade do traçado é um dos mais importantes devido à necessidade de estar em conformidade com a expectativa natural dos condutores. A avaliação da homogeneidade do traçado permite evitar trechos de estrada que possam surpreender os condutores e eventualmente provocar comportamentos anómalos que, numa situação limite, levem ao acidente. A metodologia mais usada para avaliar a homogeneidade de um traçado é aquela que analisa a variação da velocidade operacional em função dos elementos geométricos de uma estrada. A velocidade operacional, ou velocidade do tráfego, é definida como a velocidade correspondente ao percentil 85 da distribuição das velocidades adotadas pelos condutores em condições de circulação livre numa secção do traçado de uma estrada.

Vários modelos têm sido desenvolvidos para prever a velocidade operacional em elementos curvos; no entanto, o formato do modelo, as variáveis independentes, e os coeficientes de regressão são substancialmente diferentes de um modelo para o outro. Isto poderá comprovar que existem diferenças no comportamento dos condutores de uma região para a outra, e realça a falta de um modelo que seja universalmente aceite pela comunidade. A recolha da velocidade nestes modelos foi efetuada, na maioria dos casos, com recurso a um equipamento que teria necessariamente de ser manuseado por um operador, como por exemplo um medidor manual de velocidade (ou pistola LIDAR). Estes aparelhos são suscetíveis de apresentar vários problemas durante o período de recolha dos dados de campo, como por exemplo, erro humano e de apresentar influência no comportamento do condutor. Outro método é o que utiliza sensores de pavimento; no entanto, é um equipamento mais volumoso e demora mais tempo a

instalar, assim como, por ser visível tende a influenciar o comportamento dos condutores. Estes métodos permitem que a recolha de dados se faça no ponto médio da curva. Logo, os modelos que deles resultam assumem, necessariamente, que a velocidade operacional é constante no interior da curva, como é o caso do modelo desenvolvido por Lamm *et al.* (1999). Este modelo utiliza a variável *CCR* como a única variável explicativa para a estimação da velocidade operacional em curvas, e assume que a aceleração (e desaceleração) ocorre apenas em reta e é igual a $\pm 0,85 \text{ m/s}^2$ (TRB, 2011). Tal como referido anteriormente, no método apresentado pela JAE (1994), os valores indicados para a aceleração e desaceleração, dos quais se desconhece o fundamento teórico, são semelhantes ($\pm 0,8 \text{ m/s}^2$).

Outro modelo foi desenvolvido por Ottesen e Krammes (2000), que se baseia essencialmente nos mesmos pressupostos que o de Lamm *et al.* (1999), onde os dados foram recolhidos pontualmente em curvas e retas com medidores manuais de velocidade em estradas rurais de duas vias. Nos estudos que Fitzpatrick efetuou com outros investigadores, *i.e.*, Fitzpatrick e Collins (2000) e Fitzpatrick *et al.* (2000b), baseando-se no mesmo procedimento que os anteriores (*i.e.*, recolhendo os dados no ponto médio da curva e da reta de aproximação), foi também desenvolvido um modelo de estimação da velocidade em curvas, assim como um modelo para prever a desaceleração e aceleração em função do raio da curva circular, como referido no Apêndice D, resultando numa desaceleração máxima de $-1,0 \text{ m/s}^2$ e uma aceleração máxima de $0,54 \text{ m/s}^2$.

A limitação mais importante nos modelos baseados em recolha de dados pontuais é que os dados não são recolhidos nos pontos de início e fim da desaceleração e aceleração. Desse modo, os dados conduzem a modelos de desaceleração e de aceleração que não representam o comportamento real dos condutores, dado que a extensão da estrada onde ocorre a desaceleração e aceleração não é realmente determinada. Esta limitação é evitada com os métodos de recolha de dados contínuos que usam veículos instrumentados e métodos de recolha de vídeo para posterior análise. No entanto, e como referido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), estes métodos também apresentam limitações, nomeadamente no que toca ao equipamento usado, já que pode influenciar o comportamento dos condutores, se bem que de uma forma reduzida, uma vez que estes têm a consciência de que estão a ser observados e testados.

4.3 Metodologia adotada para a recolha dos dados

4.3.1 Introdução

O método usado no âmbito do presente estudo tende a provocar uma influência reduzida no comportamento dos condutores (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2010) e tem uma grande vantagem relativamente aos restantes: utiliza um equipamento de GPS portátil que permite recolher um número elevado de dados de forma contínua para posterior análise, em diferentes veículos. Com estes dados é possível construir perfis de velocidades contínuos com o objetivo de desenvolver modelos de estimação de velocidade operacional, assim como avaliar a diferença de

velocidades na transição de elementos retos e curvos, e simplificar o desenvolvimento de modelos de desaceleração e aceleração.

No entanto, é questionável se este método tem uma influência menos significativa nos condutores do que os outros métodos. A presença do equipamento e do investigador no banco ao lado tende a influenciar o comportamento do condutor, podendo assim influenciar o comportamento natural de cada um. Para atenuar esta influência, os condutores passaram por um período inicial de habituação ao veículo e ao ato de condução, tendo os primeiros quilómetros do percurso sido descartados da amostra final. Apesar disso, não é possível afirmar categoricamente que a influência que este método de recolha de dados tem nos condutores não é significativa.

4.3.2 Equipamento usado para a recolha de dados

O veículo de suporte à recolha dos dados utilizado neste trabalho de investigação foi um Peugeot 206 2.0 HDi XS. O equipamento usado, instalado no veículo, é um gravador de dados (*data logger* na terminologia anglo-saxónica) da Race Technology Ltd (modelo DL1 MK3). O equipamento tem incorporado um acelerómetro de 6g com três eixos e um GPS com 20 Hz (20 gravações por segundo) que permite referenciar os dados por períodos de tempo e em relação à posição na estrada. A figura seguinte mostra o equipamento devidamente colocado no veículo.



Figura 4.1 – Equipamento de recolha de dados instalado no veículo: a) aparelho primário modelo DL1 MK3 e câmara de vídeo de alta resolução; b) aparelho secundário modelo VIDEO4 para gravação de vídeo

Este equipamento apresenta uma exatidão de aproximadamente três metros em termos de posicionamento e uma exatidão relativamente à velocidade recolhida na ordem dos 0,1 km/h. Para além do posicionamento com recurso a GPS, recolha de velocidades e acelerações (*i.e.*, aceleração lateral, longitudinal e normal), permite também ligações com sensores externos. Este aparelho foi complementado com um outro, também da Race Technology Ltd (modelo VIDEO4) que permite a gravação de vídeo com recurso a uma câmara colocada no interior do veículo, perfeitamente sincronizada com o percurso que é efetuado. Durante o percurso os

dados são gravados para um cartão de memória para posterior análise no computador com recurso a um programa fornecido com o equipamento, que será referido na secção 4.4.2.

4.3.3 Procedimento usado para a recolha de dados

A recolha de dados foi realizada na região de Viseu, mais precisamente na estrada nacional 231 (EN 231). O troço de estrada escolhido para o estudo tem início em Viseu e o seu percurso passa pelas localidades de Santar e Vilar Seco, atravessando a dada altura o rio Dão, e termina um pouco antes da chegada à vila de Nelas. Esta estrada apresenta um volume de tráfego relativamente baixo (TMDA de cerca de 6500 veículos) e a recolha de dados, sempre que possível, foi efetuada em períodos de menor tráfego. A escolha desta estrada deve-se à sua composição de retas relativamente extensas, permitindo ao condutor atingir a velocidade desejada, e a curvas que apresentam raios variados. Na Figura 4.2 indicam-se algumas secções do troço de estrada da EN 231 que levaram à sua escolha. A proximidade à cidade de Viseu também foi um fator preponderante na escolha desta estrada, assim como uma reduzida inclinação longitudinal ao longo do traçado.

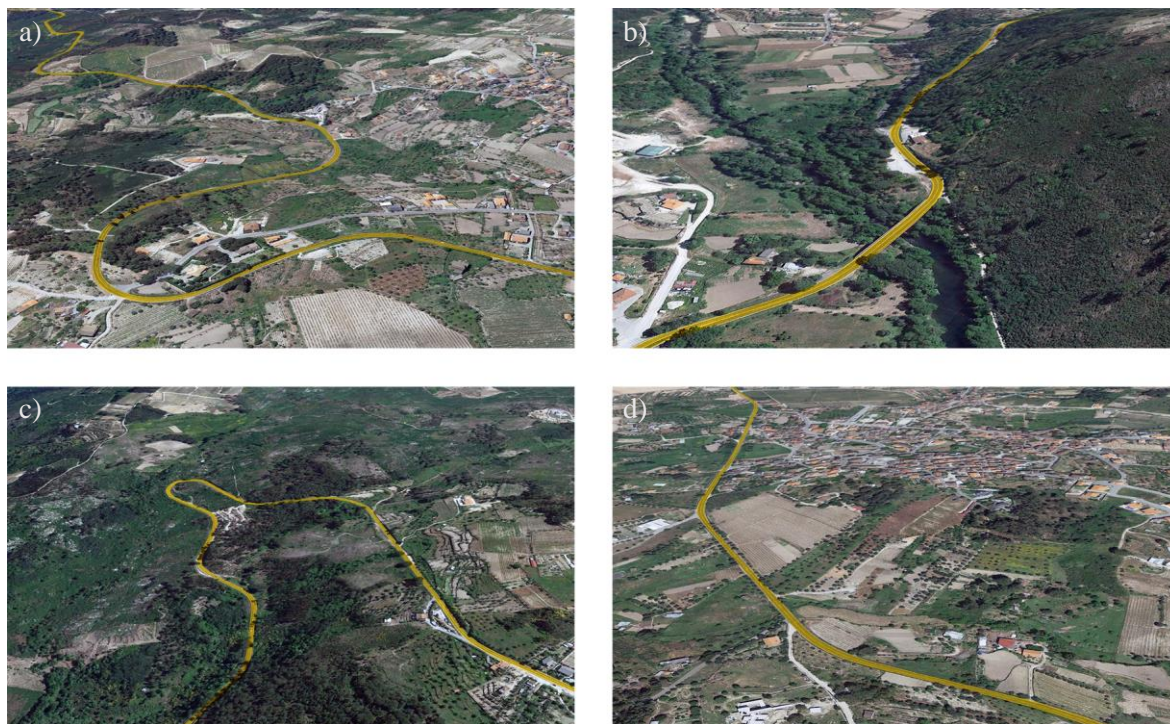


Figura 4.2 – EN 231: a) secção próxima de Viseu com uma sequência de várias curvas e retas; b) travessia do rio Dão; c) secção próxima da localidade de Santar com uma sequência de várias curvas acentuadas; d) secção próxima da localidade de Vilar Seco com uma sequência de retas extensas (adaptado de Google Maps, 2015)

Trata-se de uma estrada rural de duas vias, pavimentada e em boas condições, com largura de faixa de rodagem de aproximadamente sete metros. As bermas são pavimentadas na maioria da sua extensão, e no troço estudado a sua largura média é de um metro em cada lado da faixa de

rodagem, sendo que na zona das curvas o seu valor é, normalmente, mais elevado. Esta situação, como referido anteriormente na secção 1.2, quando se verifica na transição de uma reta, que apresenta uma largura de berma inferior, para uma curva acentuada com largura de berma superior, é uma mensagem clara de inconsistência que é transmitida aos condutores. Como se trata de uma estrada interurbana apresenta um limite legal de velocidade de 90 km/h, e em algumas zonas é indicada uma velocidade máxima de 70 km/h, ou até mesmo de 50 km/h em curvas mais acentuadas ou atravessamentos de localidades. O trecho de estrada analisado apresentava um controlo semafórico de velocidade nas imediações de uma localidade e foi então dividido em dois trechos com aproximadamente quatro e nove quilómetros de extensão cada. Os dados foram recolhidos nos dois sentidos de trânsito e o trecho de estrada em questão, após divisão, não apresenta qualquer interseção principal e as bermas são pavimentadas e livres de obstrução. Esta estrada, por apresentar baixos volumes de tráfego, permitiu que os condutores circulassem em condições livres, obtendo-se uma amostra significativa de dados. Uma vez que o objeto de estudo é o traçado em planta, a amostra limita-se a trechos cuja inclinação longitudinal não é superior a $\pm 4\%$ e o seu valor máximo foi observado nas proximidades da travessia do rio Dão. As características gerais do troço de estrada e o número de registos encontram-se sumarizados no quadro seguinte.

Quadro 4.1 – Características do troço de estrada e número de registos nos dois sentidos de trânsito

Características	Segmento de estrada	
	Trecho 1	Trecho 2
Extensão (m)		
Sentido Viseu-Nelas	9112	3612
Sentido Nelas-Viseu	9210	3538
Número de curvas	39	8
Número de registos		
Sentido Viseu-Nelas	20669	5049
Sentido Nelas-Viseu	15192	5151

Os raios das curvas circulares variam entre os 40 m e 500 m. Alguns dos raios observados não correspondem aos mínimos recomendados pela norma de traçado (JAE, 1994). Devido ao posicionamento do controlo semafórico de velocidade, a extensão dos trechos de estrada no sentido de trânsito contrário é ligeiramente diferente. O número de registos corresponde aos dados recolhidos pelo equipamento de GPS em intervalos de 10 Hz (velocidade e posição nesse instante) e após terem sido excluídos da análise os períodos em que os condutores não circulavam em condições livres.

Os dados foram recolhidos durante os períodos dos meses de agosto e setembro de 2015 durante dias úteis, entre as 10 e as 12 horas da manhã e as 15 e 17 horas da tarde. Foram utilizados quatro condutores, todos do género masculino, com idades compreendidas entre os 20 e os 40 anos e com uma boa experiência de condução, *i.e.*, foram questionados relativamente à frequência de condução, e todos conduziam há mais de cinco anos numa média superior a 15000 km/ano. O veículo era composto por dois ocupantes, condutor e investigador. Os condutores efetuaram o percurso sempre com boas condições atmosféricas. Um equipamento de GPS (*data*

logger na terminologia anglo-saxónica), descrito na secção anterior, foi colocado no veículo e usado para a recolha dos dados. Este equipamento recolhe as velocidades praticadas pelos condutores, associadas a um instante de tempo, e cria uma base de dados que é armazenada num cartão de memória com o trajeto percorrido. Estes dados são posteriormente analisados no computador. A recolha de dados foi efetuada uma única vez para cada condutor e nos dois sentidos de trânsito. Apesar de ter havido sempre o cuidado que os dados fossem recolhidos em ambiente de circulação livre, esses dados podem não ser representativos de todos os condutores que circulam numa estrada nestas condições.

Após a colocação do equipamento de GPS no veículo, os condutores passaram por um período de habituação, percorrendo alguns quilómetros antes de iniciar o trajeto. Foi também pedido aos condutores que efetuassem uma condução normal, sem acelerações e desacelerações bruscas, que se mantivessem sempre que possível no interior da via de circulação, e sempre que se sentissem condicionados por algum veículo lento que circulasse na dianteira, que parassem o veículo e assim que a estrada se encontrasse livre, que continuassem o percurso. O equipamento também efetuava a gravação de vídeo em tempo real, o que se revelou essencial durante o tratamento dos dados. Nos casos em que os condutores foram condicionados pela presença de outros veículos que circulavam na sua proximidade, impedindo a circulação em condições livres, esses dados foram excluídos com recurso aos registos de vídeo efetuados durante o percurso, guardados automaticamente no cartão de memória pelo equipamento.

Este método permitiu recolher dados contínuos de velocidade de vários condutores ao longo dos trechos de estrada selecionados. Esses dados foram analisados individualmente para cada condutor, por sentido de trânsito. Mesmo assim, é provável que este método influencie o comportamento normal dos condutores, como indicado anteriormente.

4.4 Tratamento dos dados

4.4.1 Descrição da metodologia e princípios básicos

Após as sessões de campo terem sido efetuadas, foi necessário proceder ao tratamento dos dados recolhidos, correspondentes a cada condutor, e associar a sua posição e velocidade ao traçado. Inicialmente, os dados foram recolhidos com recurso a um equipamento de GPS e gravação de dados, como referido previamente. De seguida, os dados foram selecionados e devidamente processados, resultando numa modelação do traçado em planta com recurso à ferramenta “AutoCAD Civil 3D”, permitindo obter desse modo as características geométricas da estrada. Numa fase posterior foram construídos os diagramas de curvatura dos trechos de estrada. Uma parte do diagrama de curvatura (incluindo as curvas de transição, isto é, ainda sem a uniformização do trecho em elementos retos e curvos) do trecho 1, no sentido Viseu-Nelas, está representado na Figura 4.3.

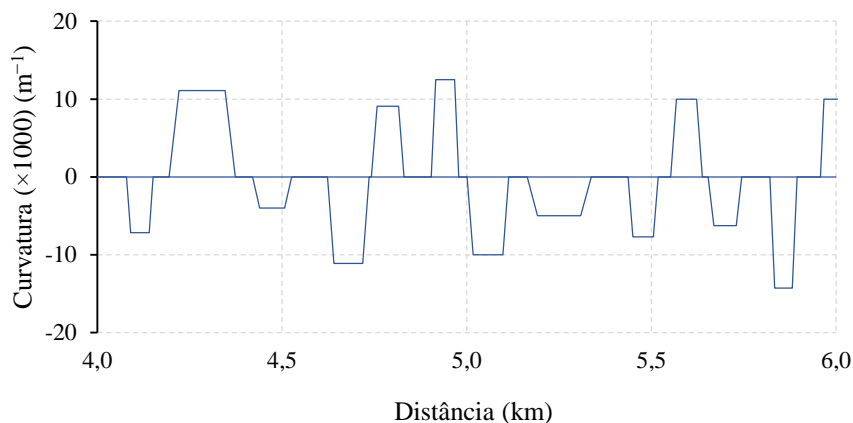


Figura 4.3 – Diagrama de curvatura parcial do trecho 1 no sentido Viseu-Nelas: (+) curva à direita; (-) curva à esquerda

A modelação do traçado permitiu de uma forma expedita retirar as características geométricas mais relevantes da estrada, como por exemplo o raio, a extensão das retas e curvas e o ângulo de deflexão (ou ângulo de desvio). Foi também possível determinar com relativa exatidão o início e o fim de cada elemento geométrico (retas, curvas e clotóides). Após o processamento dos dados, o alinhamento foi uniformizado em elementos retos e elementos curvos, recorrendo à regra de que $\frac{1}{3}$ da extensão da clotóide está associada ao elemento reto e os restantes $\frac{2}{3}$ da clotóide pertencem ao elemento curvo. Este procedimento é descrito, de uma forma detalhada, na secção seguinte.

4.4.2 Procedimento usado para a modelação do traçado

Os dados obtidos do equipamento permitiram modelar o segmento de estrada e encontrar com relativa exatidão as várias características geométricas do alinhamento horizontal. Com as coordenadas retiradas do equipamento, exportadas a partir do programa de análise, ilustrado na Figura 4.4, e com recurso à ferramenta “AutoCAD Civil 3D”, o alinhamento é modelado e as características geométricas da estrada são obtidas. Este programa fornecido pela empresa Race Technology Ltd permitiu, para além da exportação dos dados para uma folha de cálculo, uma análise extensiva dos percursos efetuados pelos condutores no segmento de estrada, *i.e.*, visualização do trajeto efetuado sobreposto em mapas de satélite, diagramas de velocidades e aceleração, gravação de vídeo sincronizada com a posição relativamente ao percurso e ao diagrama de velocidades, *etc.* Uma vez que o equipamento recorre ao posicionamento de GPS é normal ocorrerem alguns erros de posição; no entanto, como as observações foram retiradas com intervalos de 0,1 segundos, esses erros não influenciaram a modelação do traçado.

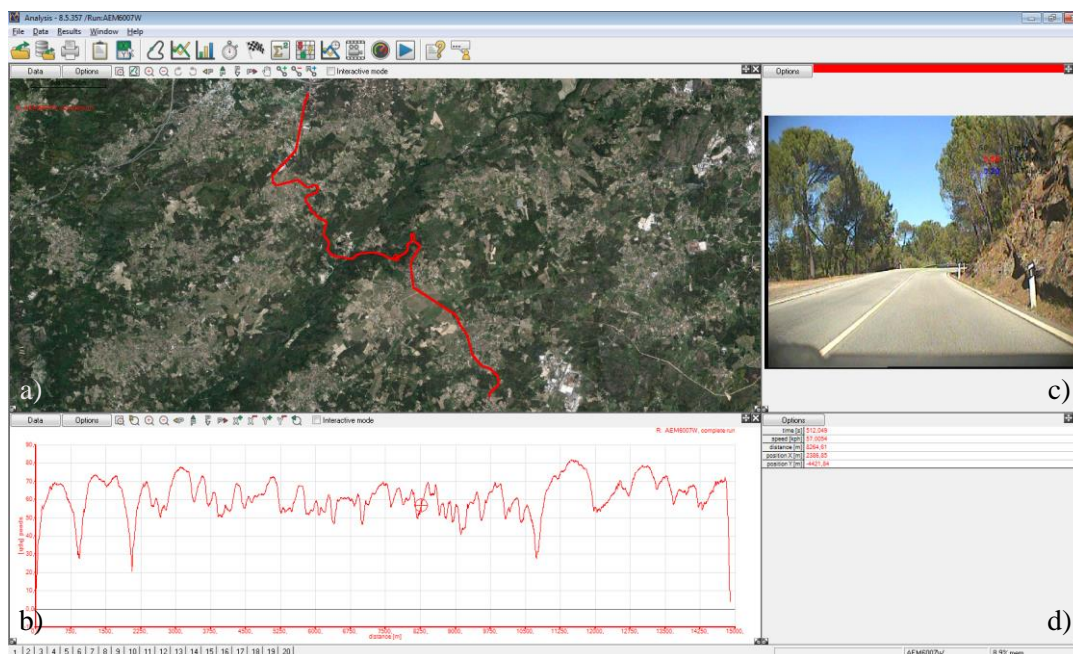


Figura 4.4 – Programa de análise de dados (RT Analysis v8.5): a) trajeto efetuado assinalado no mapa de satélite; b) diagrama de velocidades de acordo com a distância percorrida; c) janela de visualização do vídeo; d) valores de vários parâmetros (velocidade, distância, *etc.*) no instante selecionado

Com as coordenadas introduzidas na ferramenta “AutoCAD Civil 3D”, é definido o início e o fim de cada trecho de estrada. A partir destes pontos, é modelado um alinhamento ajustado às coordenadas previamente inseridas (ver Apêndice E). São então encontradas as características de cada elemento geométrico (curvas, retas e clotóides). A Figura 4.5 apresenta o alinhamento final, resultante da modelação suprarreferida.

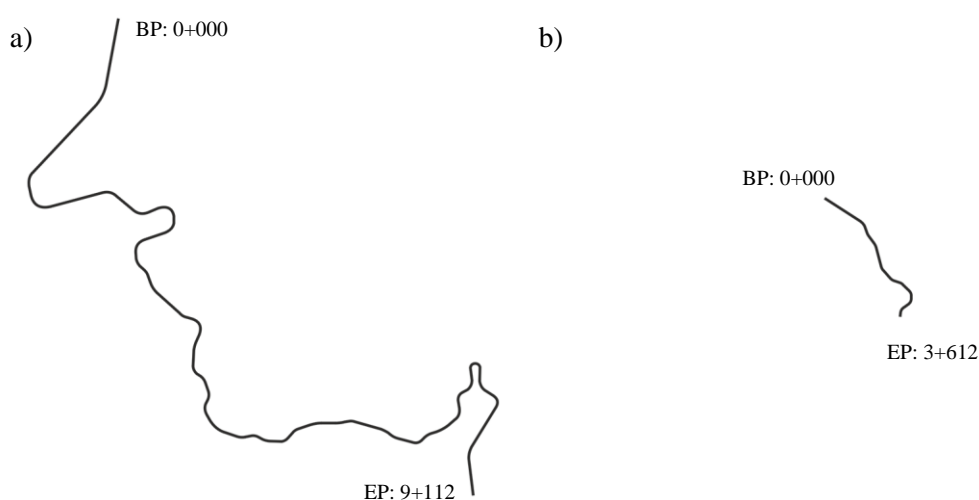


Figura 4.5 – Modelação do traçado no AutoCAD Civil 3D: a) segmento de estrada designado de trecho 1; b) segmento de estrada designado de trecho 2

A partir das características geométricas do traçado, são construídos os diagramas de curvatura dos trechos de estrada. A totalidade dos diagramas de curvatura encontram-se presentes no Apêndice F. São apresentados os diagramas de curvatura que incluem as curvas de transição e aqueles que não incluem as curvas de transição (*i.e.*, após a divisão em elementos retos e curvos).

De acordo com as regras indicadas na secção anterior, e à semelhança do procedimento usado no método do InIR (2010) na secção 3.3.4, o alinhamento é então uniformizado em elementos retos e elementos curvos. As características geométricas dos trechos analisados encontram-se indicadas no Apêndice G. Com estes dados do alinhamento, e com os dados contínuos de velocidades associados a cada trecho de estrada, são construídos os perfis de velocidades para cada condutor e analisados individualmente para cada sentido de circulação.

No decorrer dos próximos capítulos, sempre que se utilize o termo “reta” ou “curva” está-se a fazer referência ao “elemento reto” e ao “elemento curvo”, respetivamente, resultantes da uniformização do traçado.

4.4.3 Análise da variação da velocidade na transição entre elementos

Uma das abordagens para avaliar a homogeneidade do traçado é baseada no cálculo da velocidade operacional dos condutores nos elementos retos e curvos, e na posterior subtração da velocidade operacional obtida na curva à velocidade obtida na reta para obter o valor do diferencial de velocidades. De acordo com McFadden e Elefteriadou (2000), no entanto, a distribuição da velocidade em elementos retos e curvos não é a mesma, e então uma simples subtração dos valores calculados da velocidade operacional não deverá ser realizada. Também, mesmo que as distribuições de velocidade sejam idênticas, o condutor não tem que ser necessariamente o mesmo nos dois locais. Além disso, a maioria dos estudos basearam os seus cálculos em dados recolhidos em duas secções, sem verificar se estes dados correspondem à velocidade no ponto inicial e final da desaceleração (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2010).

A partir dos perfis contínuos de velocidades obtidos, de acordo com a metodologia referida neste trabalho de investigação, é possível determinar os pontos de início e fim da desaceleração e da aceleração, assim como a velocidade individual praticada por cada condutor. Assim, foi calculado neste estudo o diferencial de velocidades para cada veículo individualmente, utilizando a velocidade correspondente a cada condutor no início e fim do ponto de desaceleração e de aceleração. Para desenvolver o modelo de estimação da velocidade operacional em curvas foi considerado o menor valor da velocidade registado em curva, retirado dos perfis de velocidades individuais dos condutores. Na Figura 4.6 é representado um diagrama parcial de curvatura e nele sobreposto um perfil contínuo de velocidades.

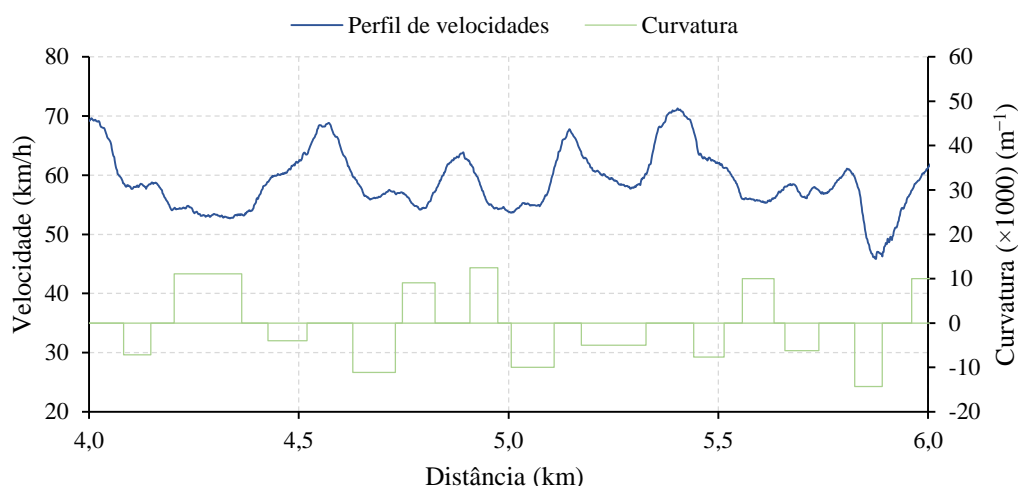


Figura 4.6 – Diagrama parcial de curvatura e perfil de velocidades individual

Analisando o diagrama da figura anterior, nota-se que os condutores (neste caso trata-se do perfil de velocidades de um condutor durante uma sessão típica de recolha de dados) tendem a desacelerar muito antes do início da curva, e começam a acelerar ainda no interior da curva, algumas das vezes antes de atingirem o ponto médio da curva circular. Isto pode dever-se a vários fatores, entre eles, a extensão da reta anterior à curva ou a visibilidade a montante. Desde logo, pode-se concluir que a velocidade em curva não é constante como tem sido assumido em vários métodos de avaliação da homogeneidade do traçado.

4.5 Considerações finais

A metodologia adotada para a recolha de dados permitiu modelar perfis de velocidades contínuos e desse modo analisar com maior detalhe o comportamento dos condutores. No entanto, não foi conclusivo se o equipamento tem menor influência que os restantes métodos de recolha de dados. Os modelos que resultam deste tipo de análise serão mais exatos que aqueles que recorrem a uma recolha de dados em pontos pré-definidos do traçado, como seja o ponto médio da curva. Desta forma, através da metodologia adotada, é possível determinar o ponto onde ocorre o início e fim da desaceleração e aceleração, bem como a velocidade mínima adotada pelos condutores em curva. Foi também possível observar que a velocidade em curva não é constante, como é assumido em vários métodos de avaliação da homogeneidade do traçado. A utilização da ferramenta “AutoCAD Civil 3D” para a modelação do traçado, combinada com o veículo instrumentado de recolha de dados, resulta numa metodologia inovadora que permite, de uma forma expedita, obter as características geométricas do alinhamento horizontal, revelando-se crucial para o desenvolvimento do modelo de previsão de perfis de velocidades.

5 Desenvolvimento de uma proposta para avaliação da homogeneidade do traçado

5.1 Enquadramento

A maioria dos métodos usados para avaliar a homogeneidade do traçado em estradas de duas vias e faixa de rodagem única são baseados na análise da velocidade praticada pelos condutores. Procedeu-se a uma revisão da bibliografia na procura de modelos existentes em Portugal, assim como metodologias desenvolvidas a nível internacional consideradas referência a nível mundial, e outras que, apesar de não terem sido desenvolvidas para aplicação em estradas portuguesas, pudessem de alguma forma representar o seu traçado e o comportamento dos condutores, como sejam as metodologias desenvolvidas em Espanha ou em outros países da Europa. O método usado para a recolha e tratamento de dados, descrito no capítulo anterior, foi escolhido por ser o mais representativo em estudos recentes e aquele que permite observar o comportamento dos condutores em termos de velocidade e relação com o traçado da forma mais exata e expedita, relativamente a outros métodos de recolha de dados. Este método é semelhante ao adotado por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010) e outros investigadores que utilizam o mesmo procedimento de recolha contínua de dados, *e.g.*, Cafiso e Cerni (2012), mas com algumas diferenças, nomeadamente na modelação do traçado, tratamento e redução de dados. Desse modo, foi possível recolher uma substancial e variada amostra de dados para as situações que são estudadas no início deste capítulo: relação da velocidade com as curvas horizontais, variação da desaceleração na aproximação a uma curva, variação da aceleração na saída da curva, relação da extensão onde ocorre a desaceleração e a aceleração relativamente ao desenvolvimento da curva, entre outros. Com o objetivo de desenvolver um método alternativo de avaliação da homogeneidade do traçado em estradas rurais de duas vias, são desenvolvidas equações de previsão da velocidade operacional em curva, da desaceleração e da aceleração.

Estas equações, indicadas nas secções seguintes, foram desenvolvidas com os dados recolhidos numa estrada interurbana próxima da cidade de Viseu e com reduzido volume de tráfego, como referido anteriormente. No entanto, e apesar de terem sido validadas dezenas de observações e de ter havido sempre o cuidado que os dados fossem recolhidos em ambiente de circulação livre, essa amostragem pode não ser representativa de todos os condutores que circulam numa estrada nestas condições. O mesmo pode-se aplicar ao traçado, apesar de se tratar de uma estrada em ambiente interurbano e com variadas transições de retas e curvas, variados raios de curvas circulares, de uma extensão considerável analisada (aproximadamente 14 km de estrada em cada sentido de circulação), pode não representar na totalidade as características das estradas portuguesas de dois sentidos e faixa de rodagem única, em terreno relativamente plano. Os modelos de previsão da velocidade operacional, da desaceleração e da aceleração e os critérios adotados para sua modelação são descritos nas secções seguintes. Contudo, estes modelos só podem ser utilizados como uma ferramenta de avaliação da homogeneidade do traçado quando associados a limites de consistência e a diagramas de velocidades. Desse modo, é também desenvolvido e calibrado um modelo de cálculo, a partir do modelo de *car-following* de Gipps, para determinar os perfis de velocidades associados a um troço de estrada e, recorrendo a um conjunto de regras pré-estabelecidas, prever o desenvolvimento das velocidades ao longo do traçado e avaliar, conseqüentemente, a sua homogeneidade.

5.2 Dados de base

A partir da uniformização do troço de estrada em elementos retos e curvos, foram obtidas as características representativas do alinhamento horizontal do segmento em estudo. As variáveis consideradas mais importantes para o desenvolvimento dos modelos seguintes são o raio da curva circular, a extensão da curva, o ângulo de deflexão (numericamente igual ao ângulo ao centro, AC), e a extensão da reta. O ângulo de deflexão é também designado na literatura por ângulo de desvio. Os valores do raio variam entre 40 m e 500 m, a extensão das curvas entre 32,7 m e 232,3 m, o ângulo de deflexão entre 9,85° e 120,75°, e a extensão das retas variam entre 17 m e 1050 m. O ângulo de deflexão é calculado a partir da equação seguinte (Branco *et al.*, 2001):

$$\Delta = \frac{180 L_C}{\pi R} \quad (5.1)$$

onde Δ é o ângulo de deflexão da curva (°), L_C é a extensão da curva (m), e R é o raio (m). Um outro parâmetro já referido anteriormente e que tem sido investigado de forma extensiva, *e.g.*, Lamm *et al.* (1999), Fitzpatrick *et al.* (2000b), Nie e Hassan (2007), é a taxa de variação da curvatura (*CCR*). Este parâmetro pode ser calculado pela equação seguinte:

$$CCR = \frac{\Delta}{L_c} \quad (5.2)$$

onde CCR é a taxa de variação da curvatura (ou sinuosidade) ($^{\circ}/\text{km}$), Δ é o ângulo de deflexão da curva ($^{\circ}$), e L_c é a extensão da curva (km). Este parâmetro é uma das variáveis mais importantes relativamente à velocidade operacional numa situação de acidente (Lamm *et al.*, 1998). Encontra-se aqui representado considerando apenas a curva circular, mas pode incluir também a influência das curvas de transição (antes e depois da curva circular), mas através de uma equação diferente. Neste caso, em que se relaciona apenas com a curva circular, substituindo a primeira equação para o cálculo do ângulo de deflexão na equação (5.2) vem que $CCR = 57295,78/R$. Este parâmetro também pode ser relacionado matematicamente com outro parâmetro referido anteriormente, o grau de curvatura (DC). Desse modo, $CCR = 10DC$; com CCR em graus por quilómetro, e DC em graus por 100 metros de arco.

A relação entre estas variáveis e a velocidade operacional, a desaceleração e a aceleração foram estudadas com o objetivo de desenvolver diferentes modelos. As variáveis raio e CCR foram aquelas que mostraram uma melhor correlação entre os valores observados da velocidade operacional, da desaceleração e da aceleração. A extensão da curva foi a que mostrou uma menor correlação. No entanto, e como referido no parágrafo anterior, é possível relacionar a variável CCR com o inverso do raio ($1/R$). Logo, apenas a variável raio foi estudada para desenvolver os modelos que se apresentam nas secções seguintes.

5.3 Modelo de estimação da velocidade operacional em curvas

5.3.1 Introdução

Um dos objetivos deste estudo é desenvolver uma equação para prever a velocidade em curvas utilizando as características do alinhamento horizontal. Foram estudados vários modelos de regressão utilizando o raio das curvas circulares como variável explicativa. O modelo escolhido é o que apresenta uma maior correlação linear entre os valores da velocidade. Este modelo foi desenvolvido à semelhança de outros modelos aqui descritos que também utilizam o raio como variável explicativa. O valor da velocidade usado para desenvolver o modelo corresponde à velocidade mínima observada em cada curva de acordo com os dados recolhidos em campo. Um total de 284 observações foram obtidas das várias curvas analisadas. A variável explicativa usada no modelo é o raio, pois foi aquela que apresentou uma maior correlação entre a velocidade, e de acordo com outros estudos, é uma das variáveis que apresenta maior relação com a velocidade operacional. O pressuposto que a velocidade em curva é sempre constante não foi observado. Uma grande parte da desaceleração e aceleração é efetuada ainda em curva, como será verificado nas secções seguintes. Só mesmo em situações muito particulares é que foi observada uma velocidade constante na curva, como por exemplo, curvas muito próximas e com um alinhamento reto muito reduzido entre elas, e com raios semelhantes, o que não permite

ao condutor aumentar ou diminuir a velocidade, tomando a decisão de manter a velocidade constante entre esses elementos (ver curva mais à direita no diagrama da Figura 5.2 apresentada na secção 5.4.1).

5.3.2 Análise preliminar do modelo de estimação da velocidade

Foram analisados quatro exemplos de modelos de regressão linear para determinar o que mais se ajustava aos dados obtidos. Os modelos de regressão incluem apenas o raio das curvas horizontais. À semelhança de outros modelos, *e.g.*, Fitzpatrick *et al.* (2000b), Kanellaidis *et al.* (1990), Misaghi e Hassan (2005), Morrall e Talarico (1994), Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), o raio é incluído como variável independente e foram aplicadas as seguintes transformações: o inverso do raio ou curvatura ($1/R$), a raiz quadrada do raio ($R^{1/2}$), e o inverso da raiz quadrada do raio ($R^{-1/2}$), e tentou-se obter uma relação linear com estes parâmetros e os dados observados (ver Apêndice H). A análise de correlação foi efetuada com os dados obtidos nas 47 curvas referidas no capítulo anterior. Entre as várias formas do raio, a que apresentou uma maior correlação ($r = -0,71$) com a velocidade foi o inverso da raiz quadrada do raio ($R^{-1/2}$). O inverso do raio ($1/R$) também apresentou uma correlação significativa ($r = -0,69$), assim como a raiz quadrada do raio ($R^{1/2}$) que apresenta um valor do coeficiente de regressão linear muito próximo do anterior, mas neste caso com correlação positiva.

5.3.3 Modelo proposto para a estimação da velocidade em curvas

O modelo de regressão linear que mais se ajusta aos dados é indicado no Apêndice H. Para além da análise linear, foi efetuada uma análise não-linear utilizando também o raio e as suas várias transformações indicadas anteriormente, isto é, o inverso do raio, a raiz quadrada do raio, *etc.* Essa análise resultou num modelo exponencial com o inverso da raiz quadrada do raio como variável independente, tendo já sido verificado que era a que apresentava melhor correlação com os dados obtidos da velocidade. Esta equação apresenta um coeficiente de determinação (R^2) ligeiramente superior ao modelo linear referido anteriormente, igual a 0,5112 e com a raiz quadrada do erro quadrático médio (*root mean squared error*, RMSE) igual a 4,95 km/h, o que indica que o modelo explica 51,12% da variabilidade dos dados da velocidade na curva, com um intervalo de confiança igual a 68% para $\pm 4,95$ km/h, e é indicada de seguida:

$$V_{85C} = 81,29 e^{(-3,86/\sqrt{R})} \quad (5.3)$$

onde V_{85C} é a velocidade operacional em curva (km/h), e R é o raio (m). Apesar de apresentar um melhor ajustamento aos dados que o modelo linear, este não é muito significativo. Por exemplo, o erro médio relativo é de apenas 0,5%. Este modelo da equação (5.3) está representado no diagrama da figura seguinte.

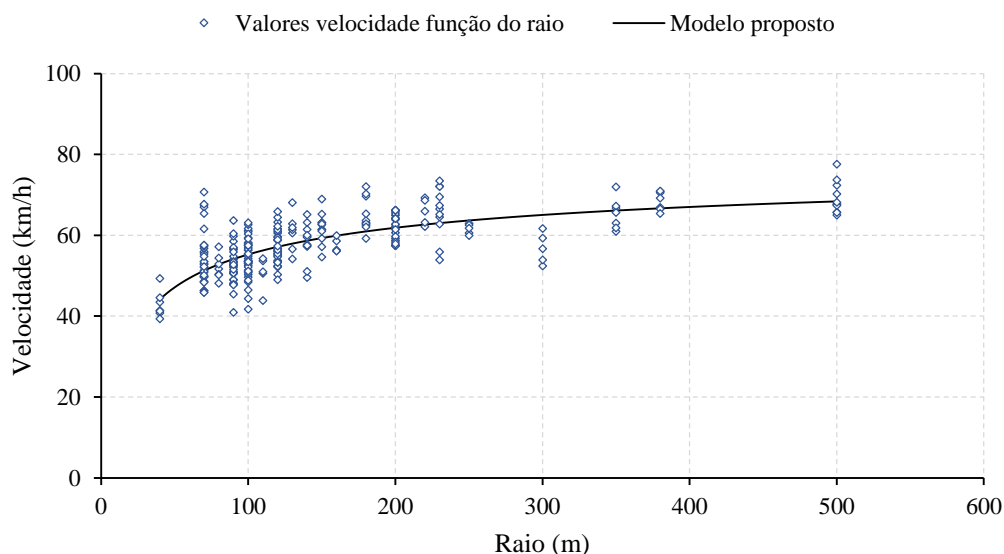


Figura 5.1 – Modelo proposto de estimação da velocidade operacional em curvas

O modelo apresenta um maior declive para pequenos raios, decrescendo à medida que o raio aumenta. Indica que para curvas com grandes raios, esta característica não é tão significativa na escolha da velocidade como é quando as curvas são mais acentuadas, isto é, quando os raios são menores. Um outro facto é que, por exemplo, para raios de aproximadamente 300 metros a velocidade é sobrestimada, de acordo com os dados obtidos.

O inverso da raiz quadrada do raio é a variável independente nesta equação, da mesma forma que o modelo simplificado desenvolvido no método do InIR (2010) indicado na secção 3.3.6.1, assim como o modelo desenvolvido por Kanellaidis *et al.* (1990). Fazendo uma análise comparativa do modelo desenvolvido com outros modelos que utilizam apenas o raio como variável explicativa, nota-se que este modelo tem tendência a subestimar a velocidade operacional em curvas (ver Apêndice I). Isto pode dever-se à metodologia em causa, uma vez que a velocidade utilizada para desenvolver o modelo e observada em curva foi sempre a mínima praticada pelos condutores, ao contrário dos outros métodos que recolhiam os dados pontualmente, por exemplo, no ponto médio da curva, o que nem sempre corresponde ao local geométrico onde se verifica a velocidade mínima.

5.4 Modelos de estimação da desaceleração e aceleração

5.4.1 Introdução

À semelhança de outros estudos, estes modelos de desaceleração e aceleração procuram completar o modelo desenvolvido para a estimação da velocidade operacional, refletindo da forma mais exata possível o comportamento do condutor na transição de um elemento reto para um elemento curvo, no caso da desaceleração, e na transição de um elemento curvo para um

elemento reto, no caso da aceleração. Normalmente, o cálculo da desaceleração é efetuado através da equação (3.2) referida na secção 3.2.5.1, utilizando os valores da velocidade operacional inicial e final, e a distância percorrida. No entanto, de acordo com Bella (2008), os níveis da desaceleração calculados com base no comportamento individual dos condutores são significativamente superiores aos níveis obtidos através de perfis de velocidade operacional. Consequentemente, a metodologia para determinar os níveis da desaceleração com base em velocidades operacionais conduz a uma subestimação da desaceleração e da aceleração efetivamente experienciada pelos condutores (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2010). Bella (2008) também apurou que as distâncias de desaceleração e de aceleração são diferentes, destacando assim a necessidade de determinar diferentes níveis para ambos os fenómenos, ao contrário das normas nacionais que admitem o mesmo valor quer para a desaceleração quer para a aceleração. Tendo em conta estas considerações, o valor da desaceleração na transição reta-curva foi calculada com base nos perfis de velocidade individuais dos condutores pela seguinte equação:

$$d_i = \frac{V_{R_i}^2 - V_{C_i}^2}{2D} \quad (5.4)$$

onde d_i é a desaceleração individual de cada condutor (m/s^2), V_{R_i} é a velocidade individual no ponto de início da desaceleração na reta (m/s), V_{C_i} é a velocidade individual no ponto final da desaceleração na curva (m/s), e D é a distância entre os pontos de início e fim da desaceleração (m). Da mesma forma, a aceleração foi calculada pela seguinte equação:

$$a_i = \frac{V_{R_i}^2 - V_{C_i}^2}{2D} \quad (5.5)$$

onde a_i é a aceleração individual de cada condutor (m/s^2), V_{R_i} é a velocidade individual no ponto final da aceleração na reta (m/s), V_{C_i} é a velocidade individual no ponto de início da aceleração na curva (m/s), e D é a distância entre os pontos de início e fim da aceleração (m). As equações são apresentadas para que o valor da desaceleração e da aceleração resulte sempre positivo (*i.e.*, em valor absoluto). Do mesmo modo que o modelo anterior de velocidades, foram estudados vários modelos de regressão utilizando o raio das curvas circulares como variável explicativa.

Os parâmetros necessários para o cálculo da desaceleração e da aceleração referidos nas equações anteriores foram retirados dos perfis individuais de cada condutor. Como exemplo, mostra-se um diagrama parcial na Figura 5.2 de um perfil de velocidades de um condutor durante uma sessão típica de recolha de dados e a delimitação dos elementos curvos (início e fim da curva).

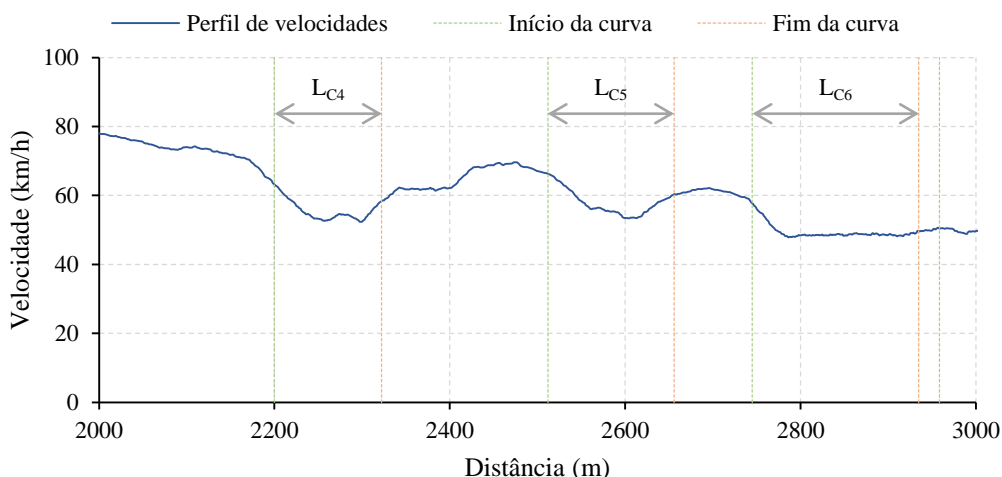


Figura 5.2 – Diagrama parcial representativo do cálculo da desaceleração e da aceleração

Para o cálculo da desaceleração, retira-se do diagrama a velocidade em reta no ponto em que se inicia a desaceleração, a velocidade no ponto em que esta termina e a distância percorrida pelo condutor. A aceleração é calculada de uma forma análoga, retira-se a velocidade no ponto de início de aceleração, a velocidade em reta no ponto em que esta termina e a distância percorrida pelo condutor. Algumas observações foram excluídas devido a extensões de reta insuficientes. Um total de 136 e 135 observações foram obtidas, respetivamente para o cálculo da desaceleração e aceleração das várias curvas analisadas. Pelo procedimento acima descrito, os valores retirados do perfil de velocidades individual de cada condutor são posteriormente transcritos para uma folha de cálculo e é determinado o valor da desaceleração e de aceleração, assim como outras observações relevantes. O quadro seguinte apresenta um exemplo deste cálculo.

Quadro 5.1 – Exemplo dos dados para o cálculo da desaceleração (apenas são apresentados os dados de um condutor no trecho 1, no sentido Viseu-Nelas)

ID	Raio (m)	D_i (m)	D_f (m)	L_C (m)	D_1 (m)	D_2 (m)	V_{Ri} (km/h)	V_{Ci} (km/h)	D (m)	F_{des}	L_{des} (m)	d_i (m/s ²)
C2	120	1314	1433	119	1256	1351	69,33	56,64	95	ANT.	37	0,65
C4	120	2200	2322	122	2149	2256	75,00	59,00	107	ANT.	56	0,77
C5	120	2512	2656	144	2465	2554	72,58	57,27	89	ANT.	42	0,86
C6	90	2745	2935	190	2714	2780	63,71	50,55	66	ANT.	35	0,88
C15	90	4629	4730	101	4584	4669	67,47	52,18	85	ANT.	40	0,83
C17	80	4908	4974	66	4886	4931	59,14	51,93	45	ANT.	23	0,69
C23	70	5825	5891	65	5779	5864	62,92	46,62	85	DEP.	39	0,81
C26	500	6329	6415	86	6325	6354	69,58	67,78	29	ANT.	25	0,33
C30	70	7036	7113	76	6974	7049	63,80	49,80	75	ANT.	13	0,82
C33	100	7456	7569	112	7444	7518	68,18	51,82	74	DEP.	62	1,02
C34	70	7618	7711	93	7601	7641	58,21	50,50	40	ANT.	23	0,81
C38	70	8374	8491	118	8340	8415	63,80	48,78	75	ANT.	41	0,87
C39	140	8894	8994	100	8832	8936	68,66	49,42	104	ANT.	42	0,84

Após este procedimento de cálculo, para determinar o valor da desaceleração e da aceleração, procede-se à redução dos dados, dos quais resultam os modelos que se indicam de seguida.

5.4.2 Análise preliminar e modelo proposto para a estimação da desaceleração

Assim, e à semelhança do modelo de velocidades, foi efetuada uma análise de vários modelos de regressão utilizando o raio como variável explicativa. A raiz quadrada do raio foi a que revelou uma maior correlação com os dados da desaceleração observados ($r = -0,64$), enquanto o inverso da raiz quadrada do raio, que no modelo de velocidades apresentava uma maior correlação, apresenta, neste caso, um valor do coeficiente de correlação linear menor e igual a 0,62. Esta análise linear encontra-se descrita no Apêndice H. No entanto, após uma análise não-linear, o modelo exponencial apresenta um melhor ajustamento aos dados com um coeficiente de determinação igual a 0,4926 e com a raiz quadrada do erro quadrático médio igual a 0,17 m/s^2 , o que indica que o modelo explica 49,26% da variabilidade dos dados da desaceleração na aproximação à curva, com um intervalo de confiança igual a 68% para $\pm 0,17 m/s^2$. Desse modo, o modelo escolhido para a estimação da desaceleração é o modelo exponencial que se indica na equação seguinte:

$$d_{85} = 1,6721e^{(-0,071\sqrt{R})} \quad (5.6)$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), e R é o raio (m). Este modelo da equação (5.6) está representado no diagrama da figura seguinte.

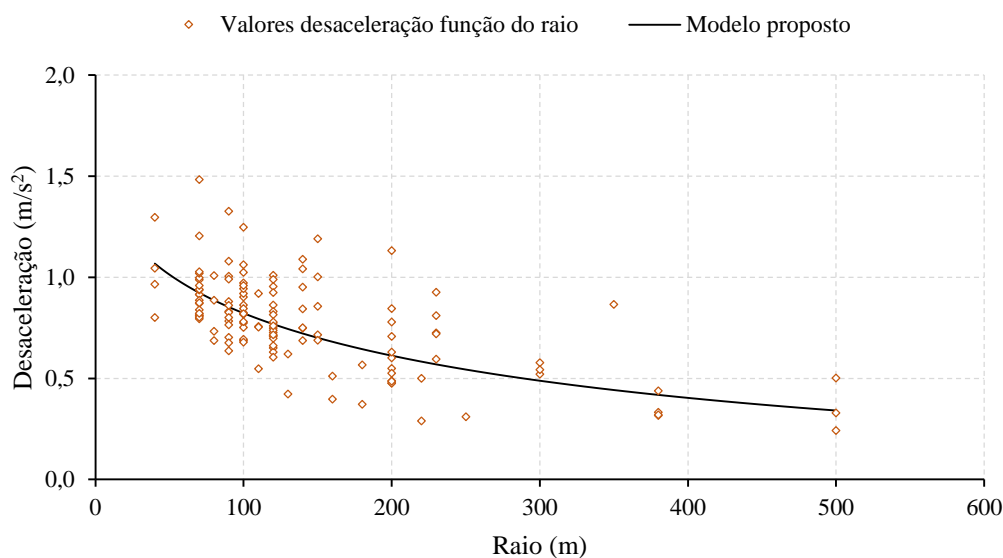


Figura 5.3 – Modelo proposto de estimação da desaceleração na aproximação à curva

Na maioria dos modelos de desaceleração indicados no Capítulo 3 e no Apêndice D, de acordo com os autores, a curvatura ($1/R$) é a variável mais significativa, com a exceção do modelo de Marchionna e Perco (2008) que utiliza um modelo logarítmico função do raio para a estimação da desaceleração. Curiosamente, este modelo é o que mais se aproxima do modelo desenvolvido neste estudo (ver Apêndice J).

Quando um condutor se aproxima de uma curva horizontal, tal como seria expectável, a desaceleração tende a aumentar à medida que o raio diminui. Os valores mínimos e máximos são de $0,34 \text{ m/s}^2$ e $1,07 \text{ m/s}^2$, respetivamente para os raios de 500 m e 40 m, sendo esta a gama de valores do raio de aplicação do modelo. O valor para a desaceleração recomendado pelas normas (InIR, 2010; JAE, 1994) é de $0,8 \text{ m/s}^2$, independentemente do raio adotado, o que de acordo com as mesmas corresponde à não aplicação dos travões. Tendo por base o modelo desenvolvido, esse nível de desaceleração corresponde a uma curva de raio igual a 108 metros. Assim é previsível que, para raios inferiores a 108 m, a adoção do valor fixo de $0,8 \text{ m/s}^2$ sugerido pelas normas nacionais, não permite desacelerar em conforto, podendo mesmo estar em causa os limites de segurança.

No estudo da desaceleração em curvas, é também importante considerar a extensão da desaceleração. Como referido anteriormente, vários estudos consideram que a velocidade permanece constante em curva e que a desaceleração ocorre inteiramente na reta de aproximação, *e.g.*, Ottesen e Krammes (2000), Fitzpatrick e Collins (2000). Como se pode observar neste estudo, e também observado em estudos anteriores (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2010), através de perfis contínuos de velocidades, esses pressupostos são invalidados. Do que foi observado, e relativamente apenas à desaceleração, pelo menos 7,7% da distância de transição ocorre na curva, ocorrendo a restante na reta de aproximação. Em média, 50,0% da distância de transição ocorre em curva, sendo o valor máximo observado de 94,3%. A percentagem média da extensão da curva afetada pela desaceleração é de 33,8%, e em 81,6% das curvas analisadas a desaceleração terminou antes do ponto médio da curva.

5.4.3 Análise preliminar e modelo proposto para a estimação da aceleração

O modelo de aceleração foi elaborado de forma análoga ao anterior. Um total de 135 observações foram validadas. Apesar deste número de observações ser semelhante aos observados em desaceleração, estes dados não correspondem aos mesmos locais da estrada (amostras diferentes). Ou seja, por exemplo, em determinadas curvas foi possível recolher o valor da aceleração, mas não o da desaceleração. À semelhança do modelo de velocidades, a variável mais significativa é o inverso da raiz do raio ($r = 0,63$). Desse modo, tentou-se estabelecer uma relação linear (ver Apêndice H).

Além do modelo linear, foi elaborado um modelo não-linear com um melhor ajustamento que o anterior com um R^2 igual a 0,4352 e com a raiz quadrada do erro quadrático médio igual a $0,14 \text{ m/s}^2$, o que indica que o modelo explica 43,52% da variabilidade dos dados da aceleração

na saída da curva, com um intervalo de confiança igual a 68% para $\pm 0,14 \text{ m/s}^2$. O modelo de regressão que mais se ajustou aos dados é o indicado pela equação seguinte:

$$a_{85} = 4,8999 R^{-0,451} \quad (5.7)$$

onde a_{85} é a aceleração (m/s^2), e R é o raio (m). Este modelo da equação (5.7) encontra-se representado na figura seguinte.

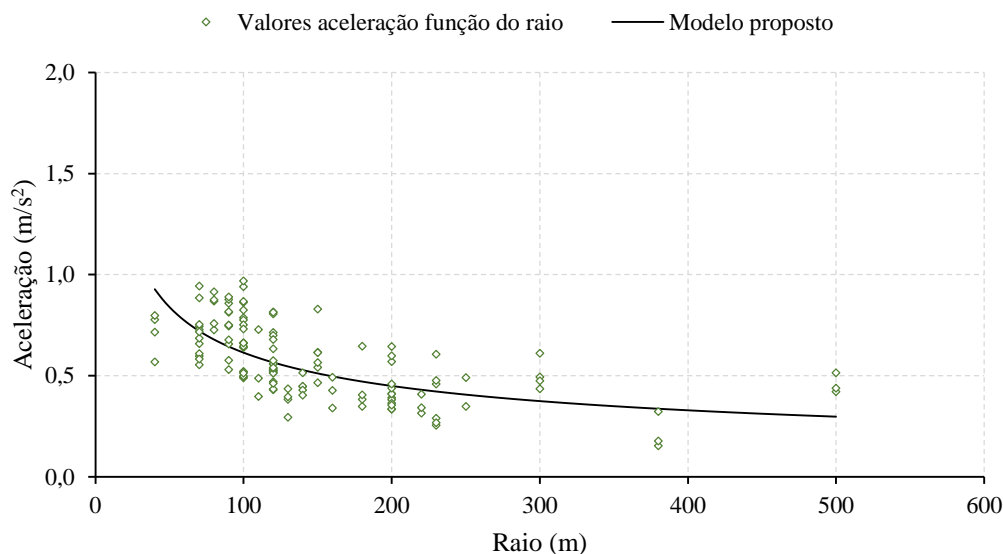


Figura 5.4 – Modelo proposto de estimação da aceleração na saída da curva

Do que foi observado, e relativamente apenas à aceleração, pelo menos 8,5% da distância de transição ocorre na curva, e o restante ocorre na reta. Em média, 50,2% da distância de transição ocorre em curva, sendo o valor máximo observado de 95,4%. A percentagem média da extensão da curva afetada pela aceleração é de 42,3%, e em 26,7% das curvas analisadas a aceleração iniciou-se antes do ponto médio da curva. O valor recomendado nas normas (InIR, 2010; JAE, 1994) é de $0,8 \text{ m/s}^2$, independentemente do raio adotado, o que corresponde a uma ligeira pressão no acelerador. Este valor é observado em raios de 55 metros, sendo que o seu valor máximo corresponde a $0,93 \text{ m/s}^2$ e o valor mínimo a $0,3 \text{ m/s}^2$, para raios de 40 m e 500 m, respetivamente. Conclui-se assim que a necessidade que o condutor tem de voltar à velocidade desejada em reta, após percorrer uma curva com um raio reduzido que obriga a uma substancial redução de velocidade, resulta na adoção de maiores níveis de aceleração à saída da curva. Desse modo, e partindo deste pressuposto, o modelo representado aparenta estar coerente. Importa ainda sublinhar que para raios de aproximadamente 500 metros a aceleração proposta pela norma é sobrestimada comparativamente aos resultados obtidos.

O modelo de aceleração desenvolvido por Fitzpatrick *et al.* (2000b), indicado no Apêndice D, é representado por valores médios para diferentes intervalos de raios. No Quadro 5.2 é apresentada uma análise comparativa com os valores médios do modelo proposto da equação (5.7) e o modelo destes autores.

Quadro 5.2 – Valores da aceleração médios em função do raio

Raio (m)	Aceleração (m/s ²)	
	Fitzpatrick <i>et al.</i> (2000b)	Modelo proposto
175 < R < 250	0,54	0,45
250 < R < 436	0,43	0,34
436 < R < 875	0,21	0,27 (R < 500)
R > 875	0,0	-

Apesar de se tratar de uma comparação a valores médios, o modelo de aceleração proposto apresenta valores muito próximos daqueles observados pelos outros autores (Fitzpatrick *et al.*, 2000b) em estradas dos Estados Unidos, e inferiores ao valor fixo de 0,8 m/s² sugerido pelas normas nacionais.

5.5 Modelo de previsão de perfis de velocidades

5.5.1 Introdução

Este ponto apresenta o desenvolvimento de um modelo de previsão de perfis de velocidades ao longo de um trecho de estrada, tendo por base o modelo de *car-following* de Gipps (1981). Os modelos de *car-following* procuram modelar o comportamento dos condutores quando estes seguem outros veículos, através de algoritmos complexos. São normalmente usados em modelos de microssimulação e têm como objetivo gerar a resposta de um condutor relativamente ao veículo que segue à sua frente. O modelo de Gipps, associado à aplicação de microssimulação Aimsun⁶, é o modelo de “distância segura” atualmente mais utilizado. Estes modelos assumem que os condutores tendem a manter uma distância de segurança para os veículos que seguem à sua frente. Essa distância é calculada como a distância que evita a colisão, em caso de desaceleração súbita do condutor (Vasconcelos, 2014).

Este modelo será adaptado de acordo com determinadas regras de forma a traduzir o comportamento dos condutores, e numa fase seguinte procede-se à sua calibração através de um processo de otimização, com base num algoritmo genético (AG), e consequentemente à sua validação nos trechos de estrada analisados previamente.

⁶ O Aimsun é uma aplicação de microssimulação desenvolvida e comercializada pela empresa TSS – Transport Simulation Systems sediada em Barcelona, Espanha.

5.5.2 O modelo de *car-following* de Gipps

Este modelo de *car-following* (Gipps, 1981) é do tipo “collision avoidance” cujo princípio de modelação consiste em manter uma distância de segurança atrás do veículo líder. O modelo de Gipps é constituído por duas componentes: aceleração e desaceleração. Estas componentes são descritas empiricamente pelas equações seguintes, as quais representam a velocidade de cada um dos veículos num determinado instante t , como referido em Vasconcelos (2014):

$$v_n^A(t + \tau) = v_n(t) + 2,5 a_n \tau \left(1 - \frac{v_n(t)}{v_n^d} \right) \sqrt{0,025 + \frac{v_n(t)}{v_n^d}} \quad (5.8)$$

$$v_n^B(t + \tau) = -d_n \left(\frac{\tau}{2} + \theta \right) + \sqrt{d_n^2 \left(\frac{\tau}{2} + \theta \right) + d_n \left\{ 2[x_{n-1}(t) - x_n(t) - S_{n-1}] - \tau v_n(t) + \frac{v_{n-1}^2(t)}{d_{n-1}'} \right\}} \quad (5.9)$$

onde τ é o tempo de reação, θ é a margem de segurança associada ao tempo de reação, $v_n(t)$ e $v_{n-1}(t)$ são, respetivamente, as velocidades dos veículos n (seguidor) e $n-1$ (líder) no instante t , v_n^d e a_n são respetivamente a velocidade desejada e a aceleração máxima do seguidor, d_{n-1} e d_{n-1}' são respetivamente a desaceleração mais severa que o seguidor está disposto a aplicar e a estimativa dessa mesma desaceleração, feita pelo condutor seguidor, relativamente ao veículo líder ($d_{n-1} > 0$ e $d_{n-1}' > 0$), $x_{n-1}(t)$ e $x_n(t)$ são respetivamente as posições longitudinais do líder e do seguidor no instante t , S_{n-1} é o “comprimento efetivo” do líder, isto é, o comprimento real do veículo líder L_{n-1} adicionado ao espaçamento mínimo entre veículos imobilizados s_{n-1} (para-choques dianteiro – para-choques traseiro). Ambas as equações são apresentadas em unidades SI.

A velocidade do veículo n no instante $t + \tau$ é dada pelo mínimo de $v_n^A(t + \tau)$ e $v_n^B(t + \tau)$. Quando o intervalo entre veículos é muito grande então a velocidade mínima é dada pela equação (5.8) e o veículo acelera livremente de acordo com uma lei derivada de dados empíricos, tendendo assintoticamente para a velocidade desejada v_n^d . Caso contrário a velocidade é dada pela equação (5.9), sendo que esta expressão indica a velocidade máxima que permite a imobilização do veículo, recorrendo à sua máxima desaceleração d_n , tal que no fim da manobra resulte o espaçamento mínimo entre veículos parados s_{n-1} (Vasconcelos, 2014).

Na dedução da expressão assumiu-se que a desaceleração do líder é d_{n-1}' e que o seguidor começa a travagem com um atraso de τ . É ainda assumido que os condutores têm em consideração uma margem de segurança θ para evitar desacelerar sempre à taxa máxima. Gipps fixou o parâmetro através da relação $\theta = \tau/2$ numa fase inicial do seu trabalho e normalmente esta igualdade encontra-se subentendida nas equações respeitantes às componentes de aceleração e desaceleração, como referido por Vasconcelos (2014).

A posição dos veículos pode ser atualizada facilmente fixando o intervalo de simulação igual ao tempo de reação τ . É assim possível utilizar um método de integração trapezoidal:

$$x_n(t + \tau) = x_n(t) + \frac{\tau}{2} [v_n(t) + v_n(t + \tau)] \quad (5.10)$$

O modelo aqui descrito será adaptado de forma a traduzir o comportamento dos condutores em estradas rurais de duas vias, de acordo com determinadas regras. Essas regras e o procedimento de cálculo são descritos na secção seguinte.

5.5.3 Modelo adaptado baseado no modelo de Gipps

5.5.3.1 Considerações gerais e princípios básicos

A metodologia adotada para a calibração do modelo adaptado é formulada como um problema de otimização seguindo um procedimento baseado num algoritmo genético (AG). Esta técnica utiliza princípios da evolução natural para encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização não-linear que envolvem vários parâmetros. A estrutura de otimização foi implementada em MATLAB (MathWorks, 2004) com recurso ao algoritmo genético pré-definido na extensão de otimização (*optimization toolbox*). O algoritmo começa por formar uma população inicial, e em cada iteração seleciona aleatoriamente indivíduos da população e usa-os como geradores de novos indivíduos para a próxima geração (descendentes). Após sucessivas gerações, a população “evolui” para uma solução ótima.

O modelo adaptado pressupõe o cálculo da velocidade desejada em curva através da equação (5.3) determinada anteriormente de acordo com as observações dos vários condutores. Para a determinação da estimativa da desaceleração é aplicado à desaceleração máxima desejada um fator de sensibilidade ($SF \geq 1,0$); fator este que se considerou ser igual a 1,0. Os parâmetros avaliados pelo AG, numa fase inicial, são os seguintes: *i*) velocidade desejada; *ii*) tempo de reação; *iii*) aceleração máxima do seguidor; *iv*) desaceleração máxima; *v*) espaçamento mínimo entre veículos imobilizados. É também avaliado um parâmetro adicional que estima a distância a que o condutor se encontra do fim do elemento, isto é, quando faltar esta distância para o fim do elemento, o condutor passa a ter como velocidade desejada o máximo das velocidades do elemento onde se encontra e do próximo.

É assumido que o comprimento do líder L_{n-1} é nulo e que a desaceleração do seguidor é igual no mesmo instante à do veículo líder (estimada). O cálculo é efetuado em cada instante t e o intervalo de simulação é igual ao tempo de reação. Uma vez que é assumido que o comprimento real do veículo é nulo ($L_{n-1} = 0$), na formulação do modelo fica que o “comprimento efetivo” do líder S_{n-1} é igual ao espaçamento mínimo entre veículos imobilizados s_{n-1} . Contudo, este modelo adaptado não tem como objetivo simular o veículo a jusante, mas sim a proximidade a que o condutor se encontra do elemento seguinte e proceder à respetiva aceleração ou

desaceleração consoante a situação em que este se encontra nesse instante, isto é, o veículo líder no modelo de Gipps corresponde, neste modelo adaptado, a um veículo fictício. Desse modo, o espaçamento mínimo toma um valor negativo resultando numa velocidade de entrada em curva superior à velocidade esperada desse elemento. Portanto, este modelo assume, para um determinado instante t , que a velocidade desejada v_n^d corresponde à velocidade no elemento “ i ”, a velocidade do seguidor $v_n(t)$ corresponde à velocidade no elemento “ $i-1$ ”, e a velocidade do líder $v_{n-1}(t)$ diz respeito à velocidade no elemento “ $i+1$ ”. Estes pressupostos, assim como um exemplo de aplicação, encontram-se descritos no Apêndice K.

5.5.3.2 Calibração do modelo adaptado

Para efeitos de calibração, elaborou-se um *script* em MATLAB que calcula, numa fase inicial, a raiz quadrada do erro quadrático médio (*RMSE*) de acordo com um conjunto de instruções pré-definidas. O *RMSE* indica a variabilidade média entre o perfil de velocidades simulado e o observado, *i.e.*, a distância, em média, medida na vertical desde um ponto no perfil simulado até ao perfil observado. Este critério estatístico apresenta as mesmas unidades que aquelas representadas pelo eixo vertical. Assim, o *script* procede à leitura de um ficheiro de dados com os valores dos seguintes parâmetros: distância do elemento geométrico à origem e raio da curva circular. Estes dados geométricos correspondem ao trecho de estrada que se pretende analisar. Após o início da simulação e para cada iteração são calculados os seguintes parâmetros: velocidade desejada, tempo decorrido, posição do veículo, velocidade do veículo no instante t (modelo de Gipps), *headway* nesse instante (posição do veículo líder – posição do veículo seguidor), e velocidade do veículo líder. Como referido anteriormente, neste modelo adaptado o veículo líder corresponde a um veículo “imaginário”. Deste cálculo resulta um ficheiro de saída de dados. A instrução seguinte inicia uma análise comparativa dos valores calculados anteriormente com os dados observados, procedendo à leitura do ficheiro de dados correspondente às velocidades observadas para um determinado condutor. Assim, este conjunto de instruções permite determinar para o mesmo instante as velocidades observadas e simuladas, e conseqüentemente calcular o *RMSE*. Um dos critérios fundamentais para a seleção de um modelo é a precisão relativa das suas previsões. Desse modo, o critério adotado para medir essa precisão é o *RMSE*, e determina-se da seguinte forma:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}} \quad (5.11)$$

onde *RMSE* é a raiz quadrada do erro quadrático médio, e_t é o erro de previsão no período t , *i.e.*, a diferença entre o valor das observações no período genérico t e o valor previsto obtido pelo modelo, e n é o número de períodos.

A partir deste ponto inicia-se a otimização através do algoritmo genético. Os resultados obtidos anteriormente são lidos pelo MATLAB que os compara com as observações de forma a calcular

a correspondente qualidade de ajuste (*fitness*). Concluída a avaliação de todos os indivíduos da população inicial, o AG gera uma nova população: para além dos descendentes “elite”, que correspondem aos indivíduos que na geração anterior obtiveram o melhor desempenho, o algoritmo cria descendentes resultantes da combinação de vetores de pares de indivíduos, e mutantes, aplicando variações aleatórias a indivíduos isolados (Vasconcelos, 2014). Após várias gerações, o algoritmo atinge a condição de convergência e devolve a solução ótima.

O algoritmo, como indicado anteriormente, determina os parâmetros ótimos e é calculado também, com base nesses parâmetros, o *RMSE* associado à otimização dos dados. Este procedimento de calibração é efetuado para um determinado condutor num sentido de trânsito. Os resultados são então, numa fase posterior, validados aplicando esses parâmetros ótimos ao mesmo condutor, para o mesmo trecho de estrada, mas no sentido contrário. A calibração e validação do modelo envolveu três condutores, denotados por Condutor A, Condutor B e Condutor C. Um quarto condutor, denotado por Condutor D, efetuou apenas o percurso num sentido de trânsito, portanto o modelo será somente calibrado para este condutor, pois não existem dados disponíveis para a sua validação.

O objetivo da calibração, como já referido, é numa fase posterior proceder à sua validação e assim testá-lo em condições desconhecidas. Desse modo, após a calibração do modelo para cada condutor num sentido do trecho de estrada, será testado no sentido contrário já com os parâmetros ótimos obtidos. Os limites mínimos e máximos de variabilidade impostos ao algoritmo genético são interpretados da seguinte forma pelo processo de otimização:

$$\begin{aligned} & \min_{v, \tau, a, d, S} f(\mathbf{M}^{\text{obs}}, \mathbf{M}^{\text{sim}}) \\ \text{s.a.} \quad & 11,1 < v < 25,0 \text{ m/s} \\ & 0,5 < \tau < 1,5 \text{ s} \\ & 0,3 < a < 2,0 \text{ m/s}^2 \\ & 0,3 < d < 2,0 \text{ m/s}^2 \\ & -5 < S < -50 \text{ m} \end{aligned}$$

onde f é a função de ajustamento que mede a discrepância entre as grandezas observadas e simuladas, \mathbf{M}^{obs} e \mathbf{M}^{sim} .

Os valores limite utilizados para a velocidade correspondem ao mínimo que resulta do modelo de estimação da velocidade em curvas e ao máximo observado (em reta). Os valores mínimos da aceleração e da desaceleração correspondem aos mínimos que resultam dos respetivos modelos de estimação determinados anteriormente na secção 5.4; os valores máximos são aqueles recomendados pelas normas. Na tentativa de investigar quais os parâmetros que mais influenciam o processo de otimização, é efetuada uma “análise de sensibilidade”. Note-se que não se trata de uma análise de sensibilidade no seu verdadeiro sentido, *i.e.*, não procura identificar as alterações verificadas na solução ótima quando se verificam pequenas variações

num dos parâmetros do modelo. O objetivo desta análise prende-se apenas em analisar a importância do valor destes parâmetros, isto é, tentar perceber se o resultado é semelhante no sentido Viseu-Nelas e no sentido Nelas-Viseu (independentemente) para os limites de variabilidade impostos. Se os valores desse parâmetro forem díspares em cada sentido, é indicação que a sua importância é reduzida; caso sejam próximos, é indicação que são relevantes no processo de otimização. Assim, procede-se à simulação para cada condutor, nos vários trechos de estrada, no sentido Viseu-Nelas (sentido *a*) e no sentido inverso, Nelas-Viseu (sentido *b*). Os resultados da análise são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 5.3 – Análise de parâmetros para os quatro condutores em diferentes sentidos de trânsito

Condutor	Trecho	Sentido	Conjunto de parâmetros				
			v_n^d reta (m/s)	τ (s)	a (m/s ²)	d (m/s ²)	S (m)
A	1	a	19,75	0,52	1,66	0,55	-45,06
		b	22,43	0,51	1,00	1,67	-22,19
	2	a	21,87	1,10	1,50	0,40	-16,23
		b	22,44	0,54	0,79	1,84	-48,77
B	1	a	24,80	0,78	0,89	1,32	-20,87
		b	24,28	0,81	0,39	0,93	-44,57
	2	a	20,87	0,62	0,63	1,60	-48,89
		b	24,97	0,92	1,94	1,33	-46,94
C	1	a	21,39	0,52	1,38	2,00	-41,97
		b	21,36	0,83	1,79	1,91	-49,97
	2	a	-	-	-	-	-
		b	20,85	0,62	0,80	2,00	-42,48
D	1	a	21,05	1,14	1,45	1,20	-45,02
		b	-	-	-	-	-

No caso do Condutor C, no sentido *a* do trecho 2, devido a várias condicionantes durante a sessão de campo, não foram observados dados suficientes para que possam ser utilizados no processo de calibração. Como referido anteriormente, o percurso efetuado pelos condutores foi seccionado em dois trechos de estrada; no entanto, a sessão de recolha de dados foi efetuada de modo contínuo, isto é, o condutor percorreu os dois trechos sem parar, portanto o seu comportamento é analisado por sentido de trânsito independentemente do trecho. No que diz respeito à velocidade desejada em reta, apenas no caso do Condutor B se verifica que os valores obtidos pela análise inicial se afastam em aproximadamente 4 m/s (14,4 km/h), relativamente ao sentido contrário de circulação (mas somente no sentido *a* do trecho 2). Para o tempo de reação, no caso do Condutor A este é o que apresenta a maior diferença relativamente aos restantes. Os valores da desaceleração, à exceção do Condutor C, resultam em valores muito diferentes em cada sentido de trânsito, e no caso da exceção referida, um dos valores atingiu o limite máximo imposto ao algoritmo. Os restantes parâmetros apresentam, na sua maioria, valores muito diferentes para cada sentido de trânsito. Desse modo, apenas os valores da velocidade desejada se encontram muito próximos, o que indica que este parâmetro é o que mais influencia a simulação. A partir deste ponto, e dado à variabilidade de valores do parâmetro τ , que corresponde ao tempo de reação, opta-se por tomar este parâmetro com um

valor fixo igual a 0,1 s; desse modo, o tempo de reação do veículo seguidor perante o veículo líder “fictício” é praticamente instantâneo. Assim, o processo de otimização analisará apenas os restantes quatro parâmetros previamente referidos.

De seguida procede-se à calibração do modelo para os vários condutores e apenas para o trecho 1 em toda a sua extensão, optando-se por não utilizar o trecho 2 para efeitos de calibração dado que a sua extensão é muito inferior à do primeiro trecho. Note-se que, apesar de nas figuras seguintes ser apresentado apenas uma secção do trecho em estudo, a simulação e os resultados que se sucedem, correspondem à sua totalidade. Desse modo, o *RMSE* está associado à extensão total do trecho de estrada. Assim, para os quatro condutores, após 51 gerações, o algoritmo atingiu uma condição de convergência e devolveu as soluções ótimas indicadas no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Parâmetros finais ótimos para os quatro condutores

Conjunto de parâmetros	v_n^d reta (m/s)	a (m/s ²)	d (m/s ²)	S (m)	<i>RMSE</i> (m/s)
Conductor A	19,47	1,96	0,86	-19,40	1,037
Conductor B	23,03	1,22	1,25	-6,22	1,368
Conductor C	20,88	1,92	1,50	-37,57	1,503
Conductor D	20,68	1,97	1,11	-20,63	1,211

Os resultados obtidos da otimização resultaram num *RMSE* máximo de 1,503 m/s (5,41 km/h) observado para o Conductor C. Na Figura 5.5 encontram-se representados os perfis de velocidades resultantes das observações e da simulação (valores ótimos) para os vários condutores no sentido Viseu-Nelas, numa secção arbitrária do trecho de estrada.

É introduzido também nos diagramas da figura seguinte (assim como nas figuras da secção 5.5.3.3) o perfil de velocidades resultante da aplicação da metodologia da JAE ao trecho de estrada em estudo. Foi considerada uma *VB* igual a 60 km/h para a totalidade do trecho, que corresponde a uma *VT* de 80 km/h (de acordo com o Quadro 2.2). Este método revelou algumas zonas não homogéneas do traçado, que serão abordadas e comparadas com o indicador de homogeneidade desenvolvido na secção 5.6.

Analisando a figura seguinte, verifica-se que em algumas secções os valores da velocidade apresentam uma ligeira subestimação, relativamente aos observados, e em outros casos uma ligeira sobrestimação, no que respeita à simulação com os parâmetros otimizados. É normal que os condutores adotem comportamentos diferentes em secções análogas do traçado e, por vezes, o algoritmo não consegue traduzir essa variação de comportamento.

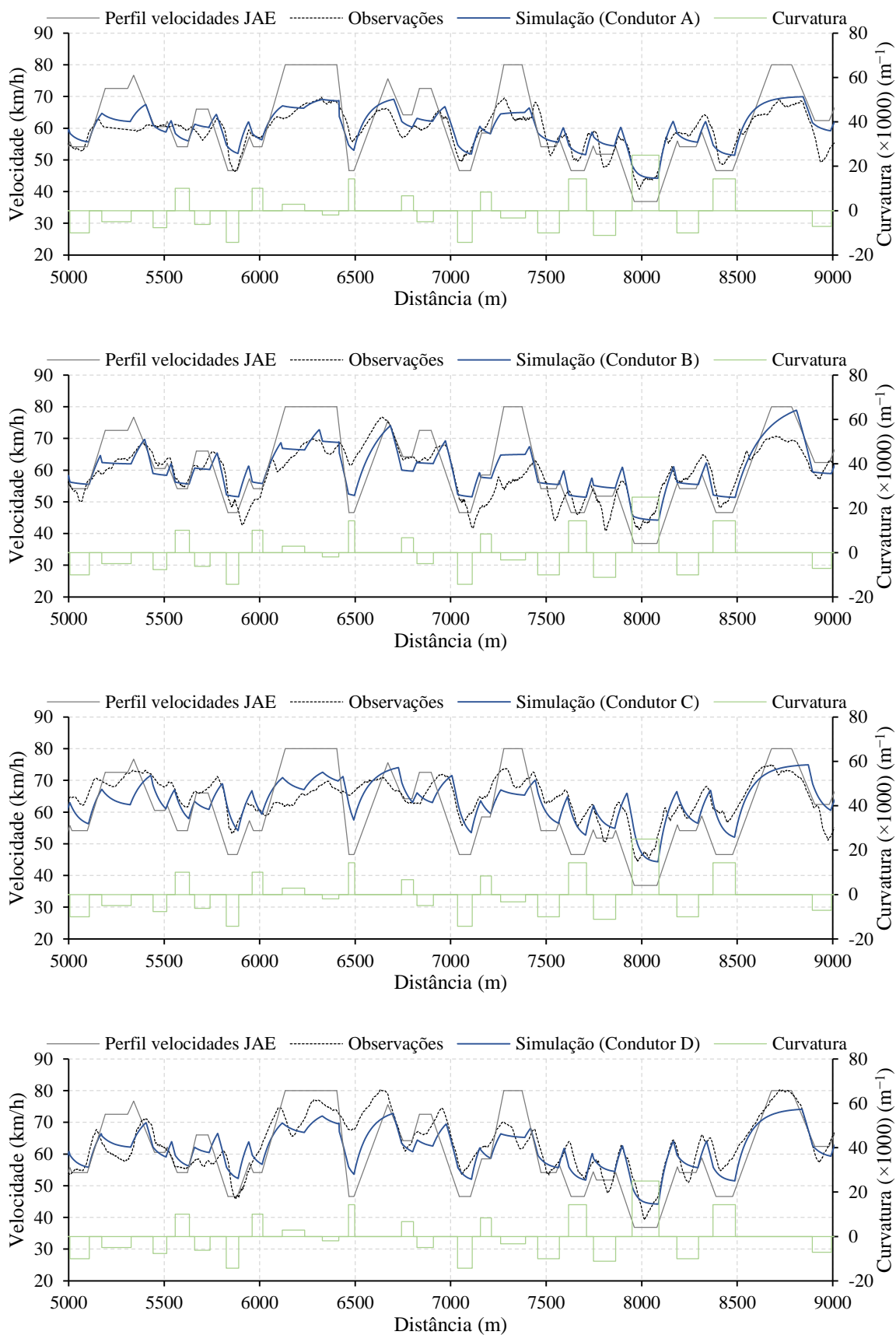


Figura 5.5 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Viseu-Nelas para os quatro condutores: observações vs. simulação, secção [5; 9] km

Com o conjunto de parâmetros ótimos obtidos para cada condutor, procede-se à validação do modelo de acordo com o referido anteriormente. Desse modo, na secção seguinte é apresentado o perfil de velocidades observado para o mesmo condutor, mas em sentido contrário, e por aplicação dos parâmetros ótimos que resultam do processo de calibração determina-se o perfil de velocidades esperado para aquele condutor específico.

5.5.3.3 Aplicação e validação do modelo adaptado

A partir do conjunto de parâmetros ótimos determinados anteriormente e para o mesmo condutor, mas no sentido de circulação inverso, procede-se à simulação por aplicação do modelo adaptado mas, neste caso, sem a utilização do algoritmo genético. Dessa forma, o resultado dessa simulação encontra-se representado nas figuras seguintes, para os vários condutores, numa secção arbitrária do trecho de estrada. À semelhança do processo de calibração, apesar das seguintes figuras representarem uma parte do trecho de estrada, a simulação foi efetuada em toda a sua extensão. Só desse modo seria possível comparar o valor do *RMSE* em ambos os processos.

Com os parâmetros obtidos para o Condutor A durante a fase de calibração, efetua-se a simulação no sentido contrário, e os resultados são representados pela figura seguinte.

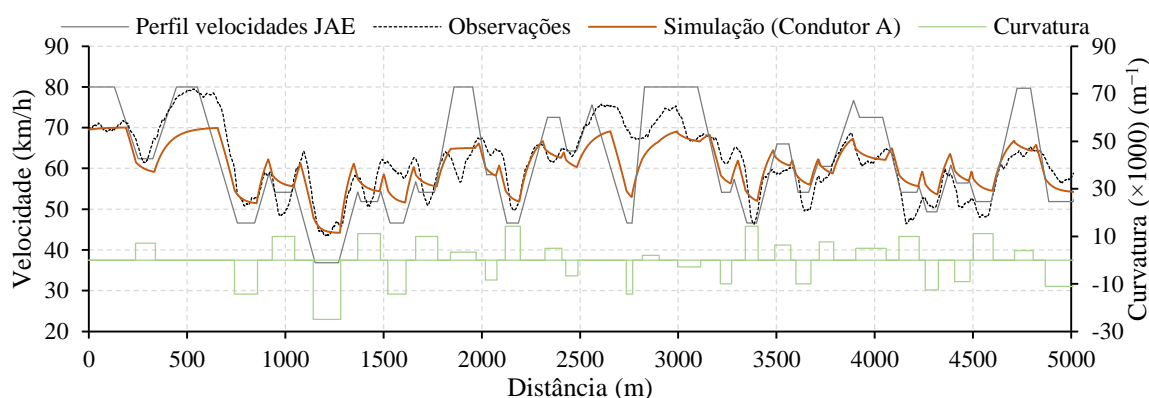


Figura 5.6 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Nelas-Viseu para o Condutor A: observações vs. simulação, secção [0; 5] km

O *RMSE* associado é igual a 1,259 m/s (4,53 km/h), que comparado com o valor registado na fase de calibração é superior em apenas 0,222 m/s (0,80 km/h), revelando um ajustamento muito satisfatório ao comportamento do condutor.

Aplica-se o mesmo procedimento, mas neste caso ao Condutor B, resultando no perfil de velocidades representado, em parte, pela figura seguinte.

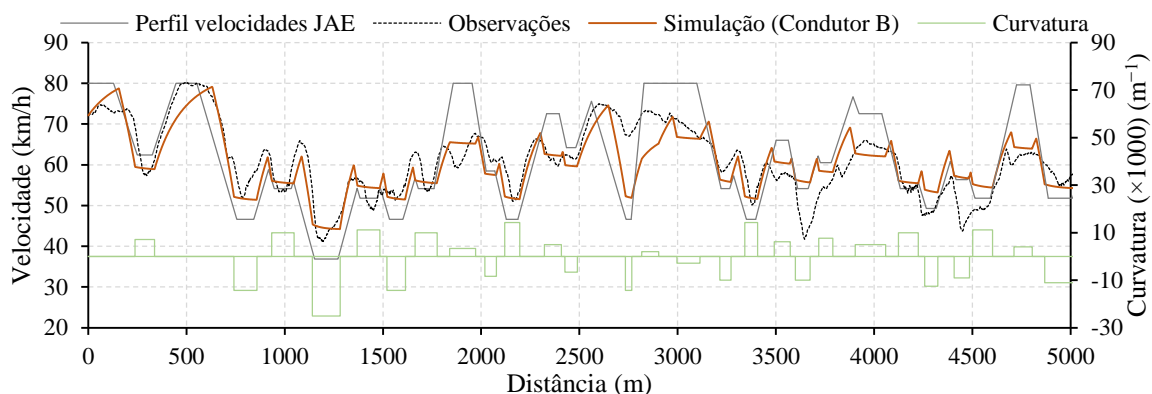


Figura 5.7 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Nelas-Viseu para o Condutor B: observações vs. simulação, secção [0; 5] km

Verifica-se que o modelo, neste caso, se ajusta de uma forma muito satisfatória ao comportamento deste condutor. O *RMSE* associado é igual a 1,695 m/s (6,10 km/h), superior em apenas 0,357 m/s (1,29 km/h) relativamente à fase de calibração.

No que respeita ao Condutor C, os resultados da simulação com os parâmetros ótimos encontram-se representados, em parte, na figura seguinte.

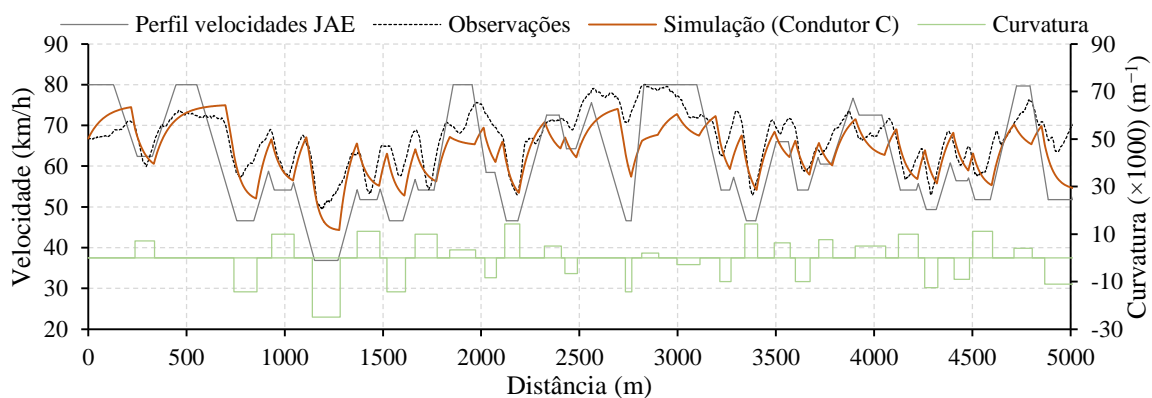


Figura 5.8 – Perfis de velocidades do trecho 1 da EN 231, sentido Nelas-Viseu para o Condutor C: observações vs. simulação, secção [0; 5] km

O *RMSE* associado é igual a 1,558 m/s (5,61 km/h), que comparado com o valor registado na fase de calibração é superior em apenas 0,055 m/s (0,20 km/h), isto é, praticamente nulo. Neste caso, o ajustamento da simulação ao comportamento observado deste condutor revelou-se verdadeiramente satisfatório.

Em suma, o modelo de previsão de perfis de velocidades torna possível, após calibração para um determinado condutor (ou gama de condutores, caso se torne uma possibilidade em desenvolvimentos futuros), reproduzir com elevada exatidão o comportamento numa situação “relativamente” desconhecida, *i.e.*, relativamente pois a sua validação foi efetuada na mesma

estrada, apesar de em sentido inverso. Assim, este procedimento traduz-se num modelo que poderá ser aplicado em estradas interurbanas e que, apesar de carecer que um maior aprofundamento, pode ser utilizado como um método alternativo de previsão de velocidades em ambiente real.

5.6 Indicador de homogeneidade do traçado

Um dos objetivos deste estudo é desenvolver um parâmetro de avaliação da homogeneidade do traçado que tenha por base o modelo de previsão de velocidades proposto na secção anterior. Desse modo, dos vários fatores analisados na otimização, aquele que mais se pode relacionar com a segurança na aproximação a um elemento isolado do traçado é a redução de velocidade (desaceleração), que de acordo com a norma (JAE, 1994) é determinante no que se refere à segurança. A velocidade desejada em curva é obtida pela equação (5.3) desenvolvida em função do raio, e a velocidade desejada em reta é otimizada para cada condutor recorrendo ao algoritmo genético. Como se considera que a desaceleração é constante ao longo do traçado, a consequência imediata de transições de elementos rápidos para lentos é que nos casos mais desequilibrados em termos de velocidade, a distância de desaceleração é maior. Então, a distância de desaceleração, quer numa análise global ou por troços, pode ser considerada como um bom indicador da homogeneidade do traçado. Assim, no caso de se tratar de um traçado homogéneo, é suposto que a maioria da sua extensão seja percorrida com as velocidades desejadas, resultando em menores distâncias de desaceleração.

O condutor procura adaptar a velocidade ao elemento geométrico que se segue imediatamente àquele em que circula. Então, vejamos: *i*) o condutor à saída de uma curva procura atingir a velocidade desejada em reta (que será a velocidade máxima para esse condutor); *ii*) o condutor na aproximação à curva procura atingir a velocidade correspondente a esse elemento que será, para uma curvatura elevada, inferior à velocidade que atingiu anteriormente em reta; *iii*) a distância de desaceleração será maior quanto maior a curvatura do elemento, partindo do princípio que em reta o condutor atingiu a velocidade desejada ou se encontrou muito próximo de a alcançar. O mesmo se pode concluir em elementos curvos contíguos (sem um elemento reto entre eles) com curvaturas muito díspares, em que a curvatura do elemento a montante é muito superior à do elemento subsequente.

Posto isto, inicia-se uma análise ao referido indicador para os quatro condutores e apresenta-se nas figuras seguintes o resultado para uma secção intermédia do traçado no sentido Viseu-Nelas. A representação é efetuada para cada condutor, sendo que no eixo vertical primário (à esquerda) são apresentadas as velocidades (resultantes da simulação com os parâmetros ótimos obtidos anteriormente), e no eixo vertical secundário (à direita) são indicadas as distâncias de desaceleração. O indicador é representado numa gradação de cores com o objetivo de destacar as secções onde ocorrem as maiores distâncias de desaceleração.

Numa fase posterior é apresentado um diagrama representativo das distâncias de desaceleração de todos os condutores e é efetuada uma análise por cada secção de 300 metros de segmento de

estrada. Este valor é relativo e foi usado sem outro significado, podendo ser adotado um valor diferente de acordo com a tipologia da estrada ou outro critério que o projetista encontre como representativo da sua análise.

A figura seguinte mostra o indicador (denotado por L_d) que corresponde à distância de desaceleração em metros, para o Condutor A na secção de estrada referida anteriormente.

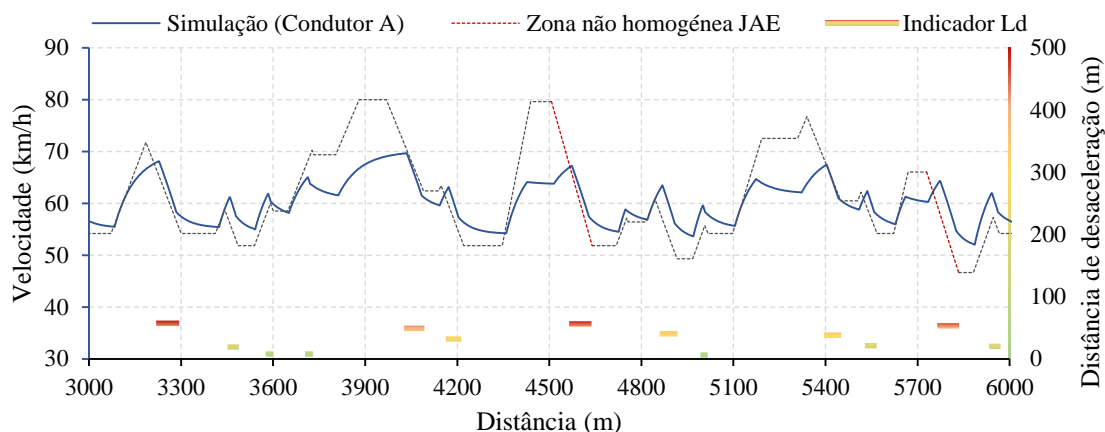


Figura 5.9 – Indicador de homogeneidade para o Condutor A, secção [3; 6] km

Encontra-se também representado na figura o perfil de velocidades resultante da aplicação da metodologia da JAE (considerando $V_T = 80$ km/h em toda a sua extensão), bem como a indicação das zonas consideradas por este método como “zonas não homogêneas” (apenas aquelas que resultam da desaceleração). Apesar de se tratarem de metodologias diferentes, é notório que as duas zonas classificadas pelo método da JAE como “não homogêneas”, neste trecho de estrada e para este condutor em particular, coincidem com duas das zonas que mostram maior distância de desaceleração e nas quais será necessário efetuar uma análise mais cuidada no que diz respeito à homogeneidade do traçado.

A necessidade de utilizar a distância de desaceleração apenas a montante do ponto de início do elemento curva, e não a distância total que englobaria também a distância que ocorre no interior da curva deve-se, primordialmente, à formulação do modelo de previsão de velocidades proposto. O modelo pressupõe que a velocidade converge assintoticamente para a velocidade desejada em curva. Contudo, em curvas com extensão reduzida tal nunca acontece, e em curvas com uma maior extensão essa velocidade é realmente atingida. Assim, a variável “extensão da curva” teria que ser considerada, caso contrário a sua variabilidade poderia de facto alienar o referido indicador. Uma vez que esta variável se revelou pouco significativa relativamente ao modelo de estimação da velocidade e aos modelos de estimação da aceleração e da desaceleração desenvolvidos nas secções 5.3 e 5.4, respetivamente, optou-se por considerar apenas a distância de desaceleração observada a montante da curva como representativa do indicador de homogeneidade do traçado. Analogamente, é representado o indicador para o Condutor B na figura seguinte.

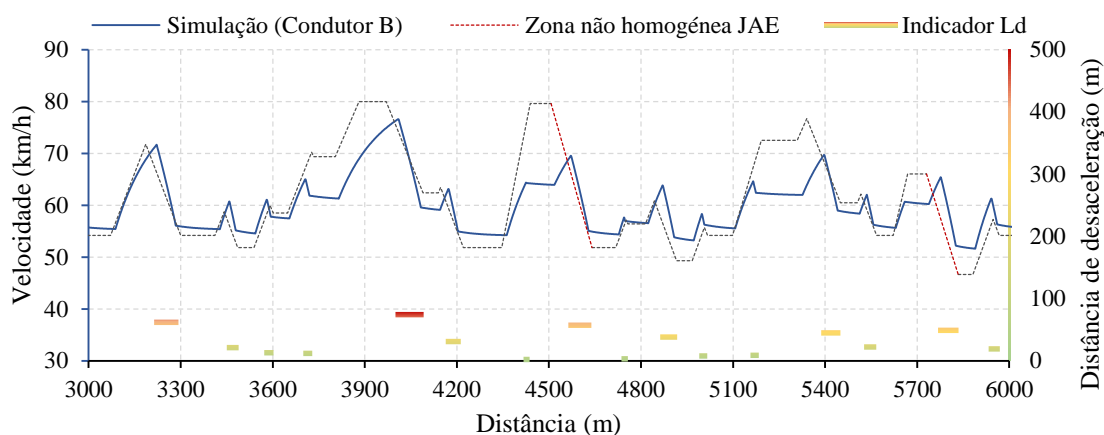


Figura 5.10 – Indicador de homogeneidade para o Condutor B, secção [3; 6] km

Devido às características intrínsecas a cada condutor, no caso dos dois condutores referenciados nas figuras anteriores, a diferença do seu comportamento é notado manifestamente no perfil de velocidades. Contudo, a diferença entre o indicador L_d de ambos os condutores não é, de todo, muito significativa, indicando que, até ao momento, o indicador é consistente. O indicador de homogeneidade do traçado para o Condutor C é o indicado na figura seguinte.

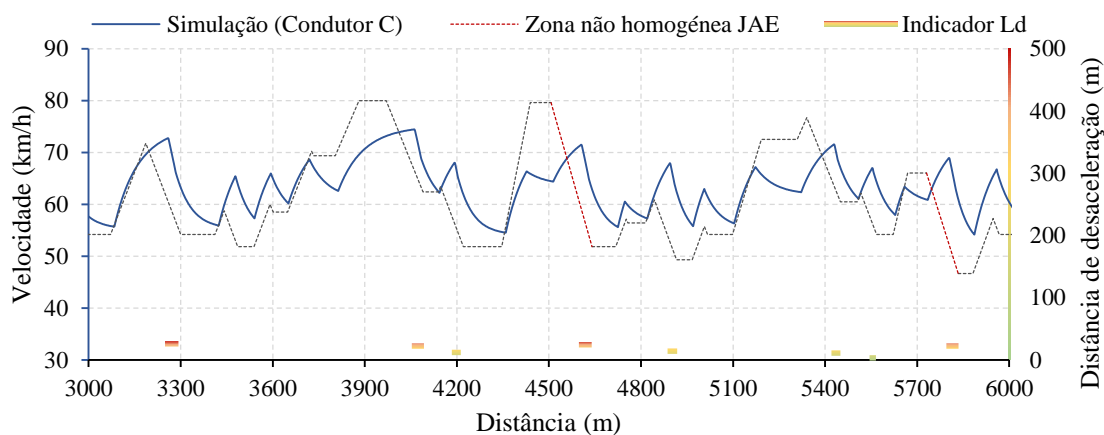


Figura 5.11 – Indicador de homogeneidade para o Condutor C, secção [3; 6] km

No caso do Condutor C, a diferença relativamente à distância de desaceleração para os dois condutores anteriores é um pouco mais significativa. Isto deve-se, possivelmente, ao comportamento deste condutor em particular que, de acordo com os parâmetros obtidos na calibração, adota uma condução um pouco mais “agressiva” que os demais, resultando em desacelerações que ocorrem, em grande parte, já no interior do elemento curvo. No entanto, as secções mais críticas correspondem às observadas nos condutores anteriores, apesar de com menor intensidade. Por fim, é indicado na figura seguinte o Condutor D à semelhança dos anteriores.

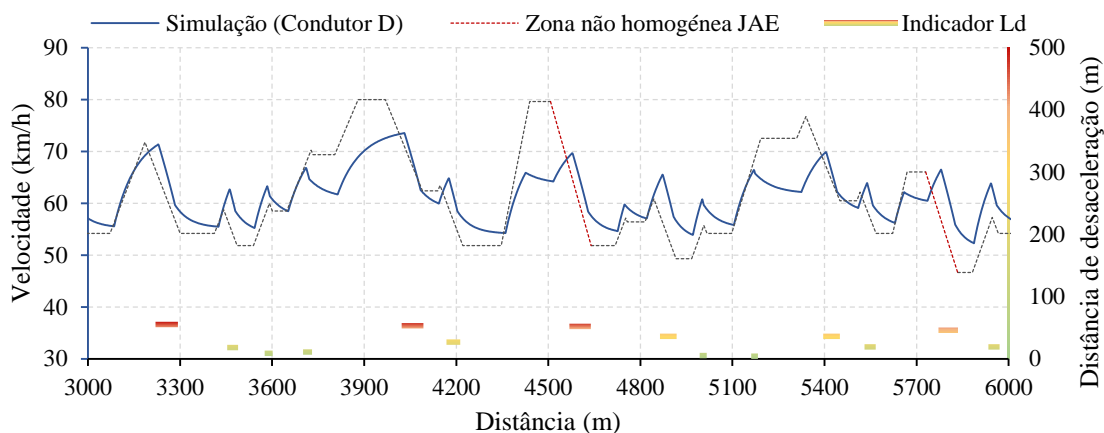


Figura 5.12 – Indicador de homogeneidade para o Condutor D, secção [3; 6] km

Um dos parâmetros otimizados na calibração do modelo individualizado para cada condutor que pode influenciar a distância de desaceleração é o parâmetro S . Assim, quanto maior seja este valor, menor é a velocidade de entrada em curva, como exemplificado no Apêndice K. No caso do Condutor C, este parâmetro resulta em velocidades em curva muito elevadas relativamente à velocidade desejada nesse mesmo elemento, raramente atingindo essa velocidade; tal acontece apenas em curvas mais extensas. Devido aos parâmetros que resultaram da otimização serem muito semelhantes, no caso do Condutor A e do Condutor D, o indicador resultante, nesses casos, é também muito semelhante. Na figura seguinte representa-se o indicador de homogeneidade do traçado L_d para os quatro condutores, sendo que a escala horizontal e vertical são equivalentes.

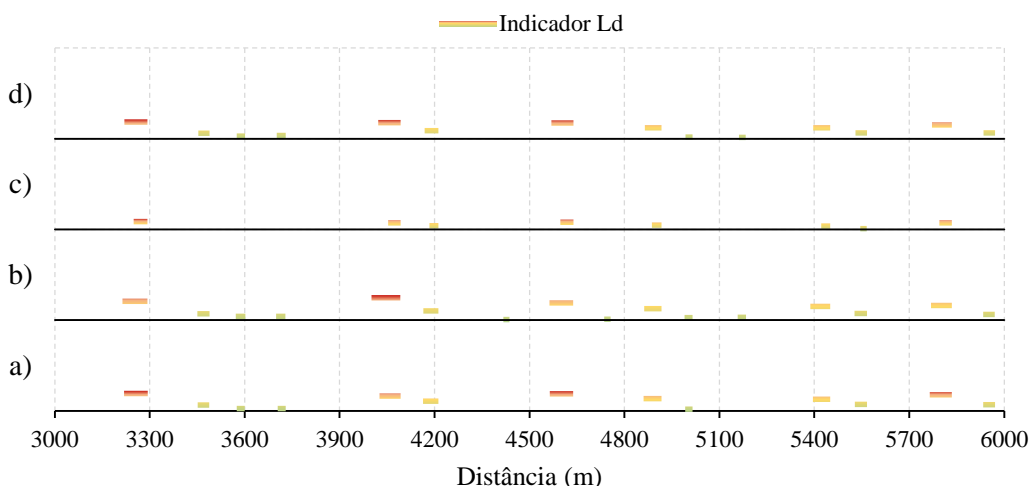


Figura 5.13 – Relação entre o indicador de homogeneidade dos vários condutores: a) Condutor A; b) Condutor B; c) Condutor C; d) Condutor D

Apesar de se considerar que o comportamento dos condutores é distinto, é notório que o indicador é consistente, nesta secção do traçado, como se verifica pela figura anterior. Recorrendo a uma análise por zonas de 300 metros, e considerando que a secção [3,0; 3,3] km corresponde à zona um e a secção [5,7; 6,0] km corresponde à zona dez, vejamos:

- i)* As zonas um, quatro, seis e dez são aquelas com características que resultam numa maior distância de desaceleração por parte dos condutores;
- ii)* As zonas dois, três, cinco e oito são aquelas cujas características resultam visivelmente numa menor distância de transição por parte dos condutores;
- iii)* As restantes zonas resultam numa distância de transição intermédia.

Assim, nesta secção de estrada em análise verifica-se que no caso *i)* é necessário efetuar uma análise mais cuidada no que diz respeito à homogeneidade do traçado, e que no caso *ii)* pode-se concluir que, de acordo com os dados obtidos da simulação para os quatro condutores, estas zonas são consideradas homogéneas. O caso *iii)* é ambíguo e a sua análise dependerá do critério do projetista.

É também possível definir um indicador de homogeneidade global, que pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n L_{d_i}}{L} \quad (5.12)$$

onde H é o índice de homogeneidade global do traçado, L_d é a distância de desaceleração (m), e L é a extensão do segmento de estrada (m). Este indicador global é mais abrangente e tem como objetivo revelar o índice de homogeneidade relativamente à totalidade da extensão do segmento de estrada considerado; quanto maior o valor de H , menos homogénea será a estrada. No caso do segmento de estrada analisado na Figura 5.13, é possível encontrar um indicador global que contemple o comportamento dos quatro condutores, isto é, o resultado de H será uma média ponderada do valor associado a cada condutor (ou gama de condutores). O resultado é apresentado no quadro seguinte.

Quadro 5.5 – Indicador de homogeneidade global do traçado

Condutor	L_d total (m)	H
A	407	0,136
B	465	0,155
C	134	0,045
D	390	0,130
		0,132

O próximo passo será tentar associar o valor deste indicador a limites de homogeneidade, à semelhança de outros métodos descritos anteriormente. Contudo, esta será uma matéria a desenvolver em estudos futuros.

5.7 Considerações finais

Os atuais modelos de cálculo de diagramas de velocidades assumem que a velocidade em curva é constante, algo que, de acordo com os dados observados, não foi verificado. Em média, metade da distância ao longo da qual se efetua a variação da velocidade ocorre no interior do elemento curvo. Uma grande parte da desaceleração e da aceleração é efetuada dentro dos limites da curva, e a aceleração ocupa uma maior percentagem da extensão da curva relativamente à desaceleração. Os modelos de estimação da velocidade operacional, da desaceleração e da aceleração foram desenvolvidos tendo por base o raio da curva circular como variável explicativa, dado que essa variável foi a que mostrou uma melhor correlação com os dados obtidos, à semelhança de outros modelos indicados neste estudo. Tendo por base o modelo de estimação da desaceleração desenvolvido, foi possível observar que para raios inferiores a 108 metros, a adoção do valor fixo de $0,8 \text{ m/s}^2$ fixado pelas normas nacionais não permite desacelerar em conforto, podendo mesmo estar em causa os limites de segurança.

O modelo de previsão de perfis de velocidades foi desenvolvido com base no modelo de *car-following* de Gipps, sendo inicialmente estimados os parâmetros com recurso a um algoritmo genético. Este modelo microscópico de simulação foi testado em ambiente real e verificou-se que os parâmetros resultantes da calibração são robustos, replicando satisfatoriamente o comportamento de vários condutores, e revelando que esta metodologia é promissora em termos de aplicabilidade prática.

O indicador de homogeneidade do traçado, desenvolvido em paralelo com o modelo de previsão de perfis de velocidades, revelou ser uma metodologia capaz em detetar zonas que carecem de uma análise mais cuidada no que diz respeito à homogeneidade do traçado, resultando numa ferramenta útil de avaliação da segurança em elementos contíguos do traçado, assim como um indicador global dessa mesma homogeneidade.

6 Análise comparativa de avaliação da homogeneidade do traçado

6.1 Introdução

O modelo desenvolvido para a previsão de perfis de velocidades ao longo de um trecho de estrada, assim como o indicador de homogeneidade do traçado, são confrontados neste capítulo com outros presentes na literatura. Um segmento de estrada foi criado para o efeito e determinou-se o seu diagrama de curvatura através das suas características geométricas. A partir dessas características, procede-se à estimação da velocidade operacional nos vários elementos do traçado e à variação da desaceleração e da aceleração (distância de transição). Os vários modelos apresentados para comparação foram obtidos através de diferentes metodologias de recolha de dados e em diferentes locais, portanto é muito provável que os resultados não se revelem muito semelhantes; a análise comparativa dos modelos de estimação da velocidade e desaceleração com outros modelos revelou isso mesmo (ver Apêndice I e Apêndice J). Por exemplo, os modelos de desaceleração desenvolvidos anteriormente por outros autores, *e.g.*, Ottesen e Krammes (2000), Lamm *et al.* (1999), foram calibrados através de velocidades recolhidas pontualmente no traçado. Assim, os valores obtidos por estes modelos não consideram a correta extensão onde ocorre a variação da velocidade na aproximação a uma curva, usando um valor único de extensão para calcular a desaceleração, o que pode resultar em valores pouco realistas. Outro ponto relevante é que nesses modelos a desaceleração é calculada pela variação da V_{85} (através de modelos) em vez da velocidade observada de condutores individuais, o que só é possível em perfis contínuos de velocidades (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2010).

Nas secções seguintes são estudados vários métodos, sendo estes aplicados aos diagramas de velocidades utilizados na literatura nacional, e posteriormente comparados com o modelo proposto de previsão de velocidades e avaliação da homogeneidade do traçado.

6.2 Avaliação da homogeneidade de um traçado

6.2.1 Descrição e características geométricas do traçado

O traçado fictício adotado corresponde a uma estrada interurbana que compreende um trecho homogêneo (de acordo com as indicações da atual norma) e outro heterogêneo, sendo este último trecho o exemplo apresentado na norma da JAE (1994). A primeira parte do traçado é composta por quatro curvas, com alinhamentos retos entre elas, e as características geométricas encontram-se dentro dos limites normativos (raios mínimos absolutos, extensão mínima dos alinhamentos retos, extensão mínima das curvas, parâmetros mínimos das clotóides, *etc.*) de acordo com o exposto na secção 2.4; a segunda parte do traçado é composta por elementos que não se encontram dentro destes limites, como observado na Figura 3.4 do exemplo indicado na secção 3.2.6.3. Esta última parte do traçado será apenas utilizada para comparar o modelo proposto com os resultados do diagrama de velocidades específicas da atual norma (ver secção 6.2.4.2). A análise deve ser efetuada por sentido de trânsito, no entanto apenas um sentido é apresentado. As características da primeira parte do traçado são as indicadas no quadro seguinte, antes e depois da divisão em elemento retos e curvos.

Quadro 6.1 – Características geométricas do traçado fictício homogêneo

Trecho de estrada não uniformizado					Trecho de estrada uniformizado				
Elemento	Início	Fim	L (m)	$R A$ (m)	Elemento	Início	Fim	L (m)	R (m)
Reta	0,0	330,0	330,0		Reta	0,0	345,3	345,3	
Clotóide	330,0	375,9	45,9	105	Curva	345,3	531,6	186,3	240
Curva	375,9	500,9	125,0	240	Reta	531,6	1090,1	558,5	
Clotóide	500,9	546,9	45,9	105	Curva	1090,1	1602,1	511,9	-340
Reta	546,9	1046,9	500,0		Reta	1602,1	2151,1	549,1	
Clotóide	1046,9	1176,6	129,7	210	Curva	2151,1	2404,5	253,3	310
Curva	1176,6	1515,6	339,0	-340	Reta	2404,5	2990,3	585,8	
Clotóide	1515,6	1645,3	129,7	210	Curva	2990,3	3470,3	480,0	480
Reta	1645,3	2125,3	480,0		Reta	3470,3	3900,3	430,0	
Clotóide	2125,3	2202,8	77,5	155					
Curva	2202,8	2352,8	150,0	310					
Clotóide	2352,8	2430,3	77,5	155					
Reta	2430,3	2950,3	520,0						
Clotóide	2950,3	3070,3	120,0	240					
Curva	3070,3	3390,3	320,0	480					
Clotóide	3390,3	3510,3	120,0	240					
Reta	3510,3	3900,3	390,0						

6.2.2 Cálculo dos diagramas de velocidades do trecho homogêneo

O objetivo desta análise é comparar alguns métodos referidos anteriormente e, dessa forma, validar o método proposto de avaliação da homogeneidade do traçado. Inicialmente são utilizados os métodos da JAE (1994) e o proposto por Lobo *et al.* (2013) para construir o diagrama de velocidades, usando o trecho de estrada não uniformizado para o efeito. São então aplicados a estes dois diagramas os indicadores de homogeneidade do traçado desenvolvidos por Polus e Mattar-Habib (2004) e Camacho-Torregrosa *et al.* (2013) (ver secção 6.2.3).

Admite-se que o trecho de estrada foi projetado em toda a sua extensão para uma VB de 80 km/h, o que resulta numa VT de 100 km/h. Após o cálculo da velocidade específica em curvas com base na equação (3.1), de aplicar a VT aos restantes elementos constituintes do traçado, e de calcular a DT de acordo com o estipulado na secção 3.2.5.1, obtém-se o diagrama de velocidades específicas representado na figura seguinte, com base na metodologia da JAE descrita na secção 3.2.6.3.

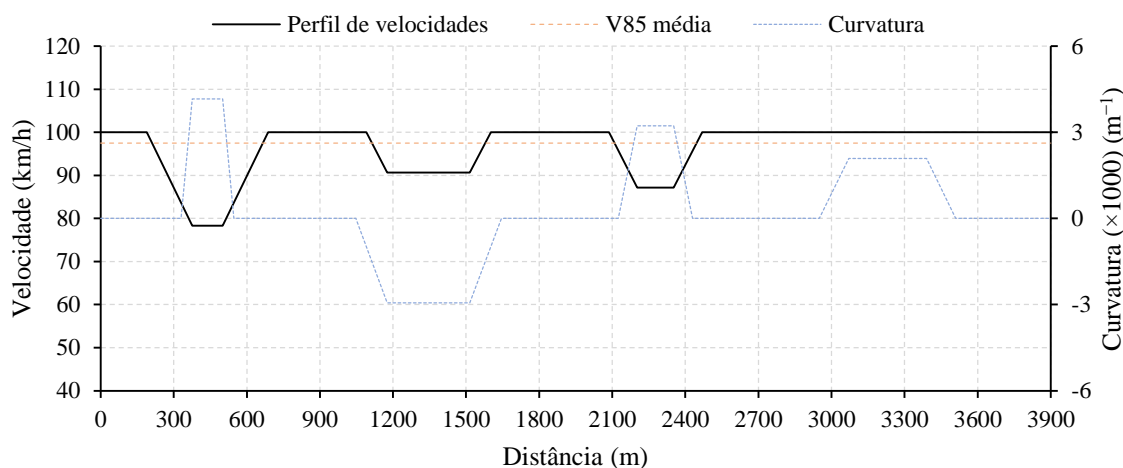


Figura 6.1 – Diagrama de velocidades para o método da JAE (1994)

Devido a um raio de 480 metros na última curva, a velocidade específica é igual a 104,78 km/h; contudo, esta velocidade não deverá ser superior à VT , então, neste caso, a velocidade é igual à dos elementos anterior e subsequente. Utilizando agora o modelo desenvolvido por Lobo *et al.* (2013) e aplicando-o à metodologia de construção do diagrama de velocidades específicas da norma em vigor, obtemos o diagrama disposto na figura seguinte.

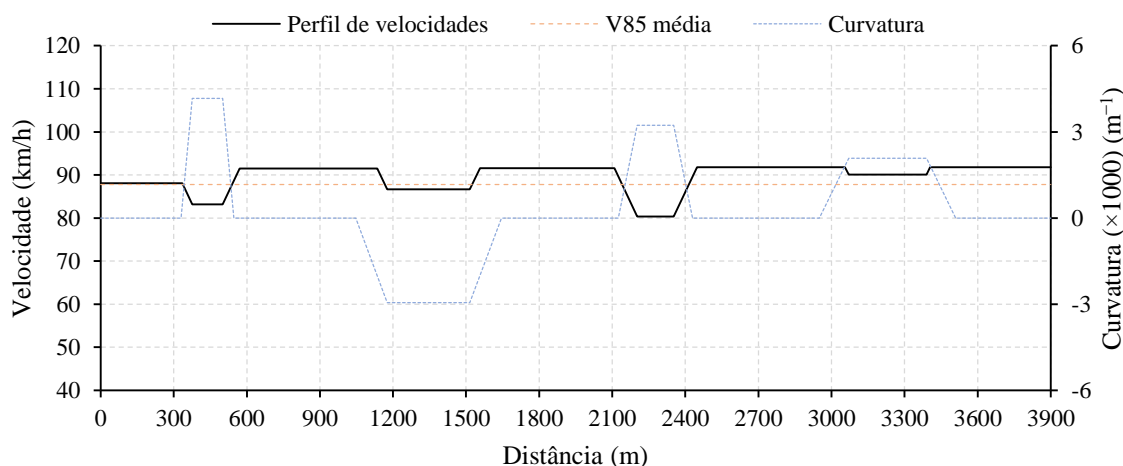


Figura 6.2 – Diagrama de velocidades para o método de Lobo *et al.* (2013)

Para aplicação da equação de estimação da velocidade do referido método, considerou-se o seguinte: *i*) largura pavimentada (via e berma) igual a 4,5 metros; *ii*) parâmetro *DLA* igual a 1,0 m e 2,0 m em curvas e retas, respetivamente; *iii*) número de interseções igual a uma por quilómetro de estrada. Estes parâmetros foram escolhidos sem qualquer significado e a sua influência é muito reduzida quando comparada com os restantes, nomeadamente com o raio da curva circular. Este método resulta em velocidades em reta inferiores às que resultam do diagrama anterior, e conseqüentemente as reduções de velocidade entre elementos contíguos são também mais reduzidas. A velocidade média ao longo do traçado é também inferior. Acontece que, em alguns casos (não expostos no diagrama), foi possível observar que a velocidade em curva resultava num valor superior à velocidade em reta, no mínimo questionável. Este fenómeno era verificado sempre que as curvas apresentavam raios superiores a 200 metros, considerando que os restantes parâmetros tomavam os mesmos valores. Quando observamos a equação, a parcela correspondente às curvas, *i.e.*, $-0,626C + 0,118\ln(R)$, sempre que o *R* toma o valor de aproximadamente 200 metros estas anulam-se, ou seja, para valores de raios superiores a este valor a velocidade em curva torna-se superior à velocidade em reta. Outra influência neste fenómeno é que quando a extensão das retas não é muito significativa relativamente à extensão das curvas, a parcela que influencia este valor, *i.e.*, $0,065E$, acaba por “pesar” pouco na velocidade da reta e resulta também em velocidades superiores em curva. Neste caso, foi considerado que a extensão da reta incluía também as curvas de transição, à semelhança do método da JAE que considera que a velocidade nestes elementos é semelhante.

Utilizando agora o traçado uniformizado, *i.e.*, dividido em elementos retos e curvos, aplica-se o método do InIR (2010) para a construção do diagrama de velocidades médias de circulação não impedida representado pela Figura 6.3, e posteriormente são aplicadas ao procedimento de cálculo deste diagrama as equações desenvolvidas pelo HERG (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013). São também aplicados a estes dois diagramas os indicadores de homogeneidade do traçado desenvolvidos por Polus e Mattar-Habib (2004) e Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), e discutidos numa fase posterior (ver secção 6.2.3).

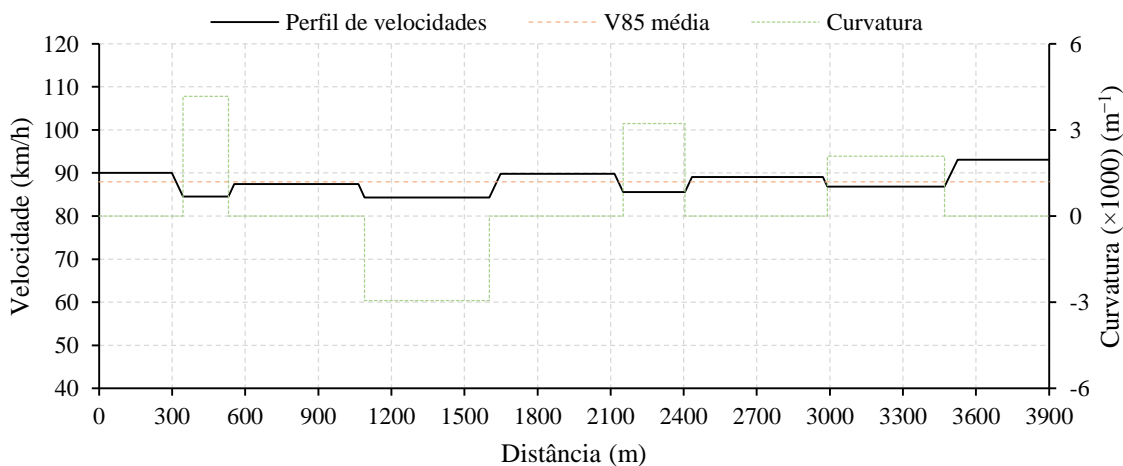


Figura 6.3 – Diagrama de velocidades para o método do InIR (2010)

No diagrama da figura anterior, foi considerada uma velocidade de aproximação à primeira curva de 90 km/h, velocidade essa correspondente, por exemplo, à velocidade máxima legal permitida nesta estrada. Neste caso, é notório uma menor velocidade entre elementos consecutivos que os anteriores dois métodos, o que resulta em diferenciais de velocidade também eles reduzidos. Contudo, convém referir que as velocidades representadas no diagrama anterior correspondem à distribuição estatística “média” das velocidades de circulação não impedida, de acordo com a metodologia do InIR. Pode-se afirmar, de uma forma simplista, que este método é menos conservador que os anteriores, mas que resulta numa velocidade média muito semelhante ao método anterior desenvolvido por Lobo *et al.* (2013). Por fim, aplicando a mesma metodologia de cálculo do diagrama de velocidades do InIR, mas utilizando as equações de estimação da velocidade desenvolvidas pelo HERG, encontra-se o seguinte diagrama representado na Figura 6.4.

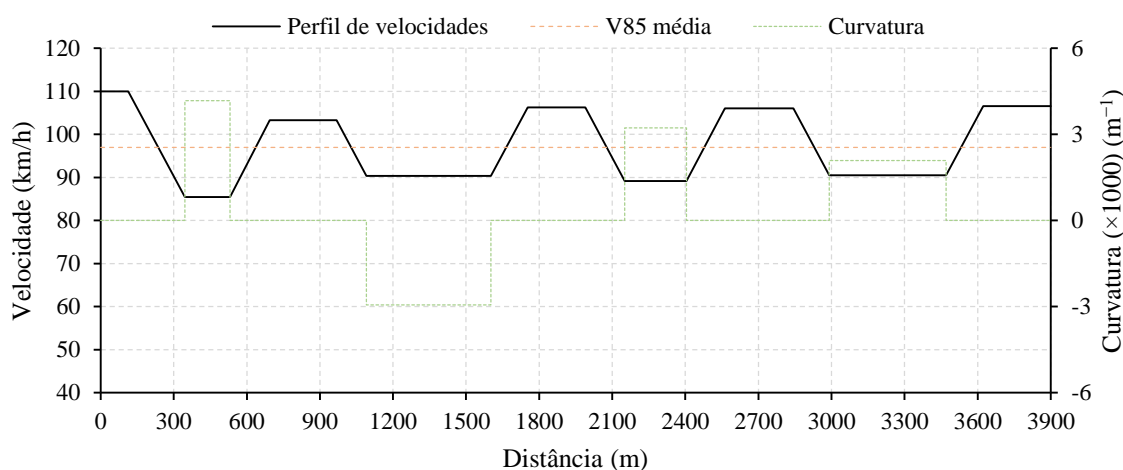


Figura 6.4 – Diagrama de velocidades para o método do HERG (Camacho-Torregrosa *et al.*, 2013)

O método do HERG revela velocidades elevadas em reta, devido ao pressuposto que a velocidade desejada pelos condutores corresponde a 110 km/h; no entanto, as velocidades em curva são, em alguns casos, semelhantes às que resultam dos métodos anteriores. Apesar de apresentar um diferencial de velocidade muito significativo, comparado, por exemplo, com o método do InIR, a velocidade média ao longo do trecho é muito semelhante à que é observada no diagrama do método da JAE.

Os resultados do cálculo dos parâmetros necessários à construção dos diagramas anteriores encontram-se indicados no Apêndice L.

6.2.3 Indicadores de homogeneidade aplicados ao trecho homogêneo

O estudo apresentado por Polus e Mattar-Habib (2004) recorre a perfis contínuos de velocidades para determinar a variação da velocidade ao longo de um segmento de estrada. Neste caso, um único valor de consistência é obtido para a totalidade do troço de estrada. Além disso, o

indicador de consistência destes autores é uma função contínua ao contrário de uma metodologia baseada em limites, com base em duas novas medidas de consistência: *i*) R_a correspondente à área relativa delimitada pelo perfil da velocidade operacional e a linha da velocidade operacional média, dividida pela extensão do segmento de estrada, calculada pela equação (6.1); *ii*) σ representando o desvio padrão das velocidades operacionais em cada elemento geométrico ao longo do segmento de estrada, calculado pela equação (6.2). Esta medida adicional foi usada de modo a complementar a primeira, dado que o R_a , só por si, forneceu, em alguns casos, resultados semelhantes para características geométricas um pouco diferentes. A equação para o cálculo de R_a é a seguinte:

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{L} \quad (6.1)$$

onde R_a é a medida de consistência (m/s), a_i é a área “i” delimitada pelo perfil da velocidade operacional e a velocidade operacional média (m²/s), e L é a extensão do segmento de estrada (m). A equação para o cálculo de σ é a seguinte:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{85_i} - \bar{V}_{85})^2}{n}} \quad (6.2)$$

onde σ é o desvio padrão das velocidades operacionais (km/h), V_{85_i} é a velocidade operacional no elemento “i” (reto ou curvo) do traçado (km/h), \bar{V}_{85} é a velocidade operacional média (km/h), e n é o número de elementos geométricos que constituem o segmento de estrada analisado. A velocidade operacional média corresponde à média ponderada das velocidades operacionais ao longo do segmento de estrada. O modelo de consistência reflete a função exponencial negativa, como se mostra na equação seguinte:

$$C = A e^{-B(R_a \cdot \sigma / 3,6)} \quad (6.3)$$

onde C é o índice de consistência do traçado, aplicado ao segmento (m/s), R_a é a medida de consistência (m/s), σ é o desvio padrão das velocidades operacionais (km/h), e A e B são dois parâmetros de calibração. Russo *et al.* (2012) também desenvolveram um modelo muito semelhante ao de Polus e Mattar-Habib para estradas rurais de duas vias em Itália. Com as medidas previamente referidas, Polus e Mattar-Habib (2004) desenvolveram o modelo de consistência, aplicado a um determinado segmento, que é representado pela equação seguinte:

$$C = 2,808 e^{-0,278(R_a \cdot \sigma / 3,6)} \quad (6.4)$$

onde C é o índice de consistência do traçado, aplicado ao segmento (m/s), R_a é a medida de consistência (m/s), e σ é o desvio padrão das velocidades operacionais (km/h). Foram também propostos limites para a definição das classes de “boa”, “aceitável” e “pobre” consistência do traçado, para estradas rurais de duas vias (ver quadro seguinte).

Quadro 6.2 – Limites de consistência do traçado (m/s) (adaptado de Polus e Mattar-Habib, 2004)

Consistência global do traçado		
Boa	Aceitável	Pobre
$C > 2$	$1 < C \leq 2$	$C \leq 1$

Aplicando este indicador de homogeneidade global do traçado, assim como o indicador referido anteriormente na secção 3.5.6 aos quatro diagramas de velocidades, calculados através de várias metodologias, resultam os parâmetros que constam no Quadro 6.3. O indicador de Polus e Mattar-Habib (2004) é dado pela equação (6.4) e o de Camacho-Torregrosa *et al.* (2013) é dado pela equação (3.24). Desta análise pode-se concluir que o parâmetro R_a é o mais difícil de quantificar, dado que é necessário determinar as áreas delimitadas pela velocidade operacional média e pelo perfil de velocidades.

Quadro 6.3 – Resultados dos indicadores de homogeneidade do traçado

Parâmetros	\bar{v}_{85} (km/h)	$\overline{\Delta V}_{85}$ (km/h)	σ_{85} (km/h)	R_a (m/s)	Polus e Mattar-Habib (2004)	Camacho-Torregrosa <i>et al.</i> (2013)
					C (m/s)	C (km/h)
Método da JAE	97,50	10,97	7,89	1,22	1,34	866,30
Método de Lobo <i>et al.</i>	87,75	5,67	4,00	0,93	2,10	1357,82
Método do InIR	87,99	3,74	2,73	0,57	2,49	2071,84
Método do HERG	96,97	17,54	9,13	1,91	0,73	536,04

De acordo com o indicador de Polus e Mattar-Habib (2004), os diagramas da Figura 6.2 e da Figura 6.3 apresentam um traçado que apresenta uma “boa” homogeneidade, enquanto o diagrama representado pelo método da JAE, ilustrado na Figura 6.1, indica uma homogeneidade “aceitável”. Por sua vez, o diagrama da Figura 6.4 é claramente indicativo de uma “pobre” homogeneidade. O segundo indicador, desenvolvido por Camacho-Torregrosa *et al.* (2013), apesar de não apresentar limites de homogeneidade, os seus resultados são muito semelhantes aos do primeiro, tendo como pressuposto que, neste caso, quanto maior o valor do indicador melhor a homogeneidade geral do traçado. O último método apresentado, que resultou no diagrama da Figura 6.4, não é muito consistente com os restantes, uma vez que resulta em velocidades muito elevadas entre elementos contíguos, mesmo estando, como validado pelos restantes métodos, aplicado a um traçado homogéneo.

Como referido inicialmente na secção 1.2.2, o método normalmente mais usado na avaliação da homogeneidade do traçado foi desenvolvido por Lamm *et al.* (1999). Estes autores apresentaram dois critérios de avaliação (designados de critérios I e II de Lamm), relacionados

com a velocidade operacional, que incluía a diferença entre as velocidades base e operacional, e a diferença entre a velocidade operacional em elementos sucessivos do traçado. A diferença entre a velocidade operacional e velocidade base ($V_{85} - V_d$) tende a ser um bom indicador de consistência num elemento isolado do traçado e, por outro lado, a redução da velocidade operacional entre dois elementos sucessivos (ΔV_{85}) afirma-se como um potencial indicador da inconsistência experimentada pelos condutores quando efetuam a transição entre dois elementos geométricos contíguos. Estes indicadores de consistência do traçado, designados de critérios I e II de Lamm, são indicados no quadro seguinte.

Quadro 6.4 – Limites para determinar a qualidade da consistência do traçado, critérios I e II de Lamm (adaptado de Lamm *et al.*, 1999)

Consistência do traçado	Critério I (km/h)	Critério II (km/h)
Boa	$ V_{85} - V_d \leq 10$	$ V_{85_i} - V_{85_{i+1}} \leq 10$
Aceitável	$10 < V_{85} - V_d \leq 20$	$10 < V_{85_i} - V_{85_{i+1}} \leq 20$
Pobre	$ V_{85} - V_d > 20$	$ V_{85_i} - V_{85_{i+1}} > 20$

Estes critérios são então aplicados de forma a avaliar a homogeneidade do traçado, como indicado no Quadro 6.5. No caso do Critério I, o ID corresponde a um elemento isolado do traçado, como seja uma reta ou uma curva; no caso do Critério II, o ID corresponde a dois elementos consecutivos do traçado, como seja a transição entre uma reta e uma curva, pela ordem que se apresentam nos respetivos diagramas (no sentido da esquerda para a direita).

Quadro 6.5 – Resultados dos critérios I e II de Lamm aplicados ao traçado

ID	Método JAE		Método Lobo <i>et al.</i>		Método InIR		Método HERG	
	Critério I (km/h)	Critério II (km/h)	Critério I (km/h)	Critério II (km/h)	Critério I (km/h)	Critério II (km/h)	Critério I (km/h)	Critério II (km/h)
1	20,0	21,7	8,1	4,9	10,0	5,5	30,0	24,6
2	1,7	21,7	3,2	8,3	4,5	2,9	5,4	17,9
3	20,0	9,4	11,5	4,8	7,4	3,1	23,3	13,0
4	10,6	9,4	6,7	4,9	4,3	5,5	10,3	16,0
5	20,0	12,8	11,6	11,3	9,8	4,2	26,3	17,1
6	7,2	12,8	0,3	11,5	5,6	3,5	9,2	16,8
7	20,0	0,0	11,8	1,8	9,1	2,2	26,0	15,5
8	20,0	0,0	10,1	1,7	6,9	6,2	10,5	16,0
9	20,0	-	11,8	-	13,1	-	26,5	-

É possível observar que o método do HERG apresenta mais inconsistências, revelando que a sua aplicação em estradas interurbanas é, comparativamente com os restantes, mais conservadora; os resultados da aplicação do Critério I a este método revela também muitas inconsistências. Considerando apenas o Critério II, apesar de em alguns casos apresentar uma “pobre” homogeneidade, estes encontram-se dentro dos limites impostos pela norma em vigor, isto é, velocidades inferiores a 30 km/h quando a transição é efetuada entre uma reta e uma curva, e velocidades inferiores a 20 km/h entre elementos sucessivos.

6.2.4 Aplicação do método proposto ao traçado

6.2.4.1 Trecho de estrada homogéneo

Esta análise comparativa engloba apenas os métodos considerados mais relevantes e muitas outras possibilidades poderiam existir, aplicando, por exemplo, outros modelos de estimação de velocidades ou até mesmo efetuar uma avaliação da homogeneidade do traçado à EN 231. Contudo, o objetivo primordial desta abordagem é relacionar o traçado de uma estrada entre vários métodos de avaliação da homogeneidade do traçado e conseqüentemente validar o modelo desenvolvido no capítulo anterior. Assim, aplicando esse método ao traçado, apresenta-se na figura seguinte o diagrama de velocidades, utilizando, por exemplo, os parâmetros correspondentes ao Condutor A, e o resultado da aplicação do indicador de homogeneidade do traçado L_d . Estão também indicados na figura os dois perfis de velocidades correspondentes aos métodos das normas portuguesas.

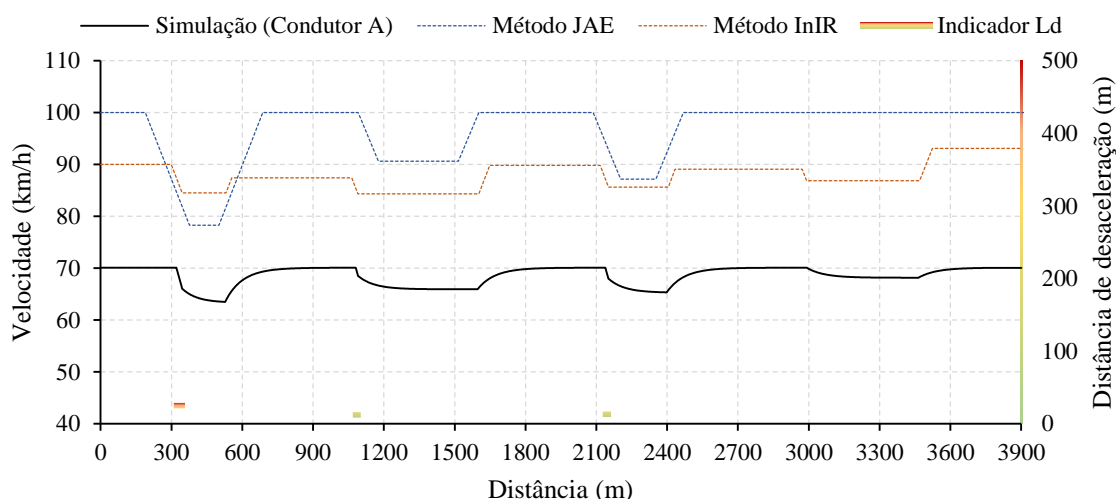


Figura 6.5 – Método proposto aplicado ao trecho homogéneo

O indicador revela, de acordo com a simulação efetuada com os parâmetros individuais deste condutor, que a zona mais crítica, no que diz respeito à homogeneidade, corresponde à primeira transição entre elementos consecutivos, isto é, ao ID 1 do Critério II. Desse modo, e de acordo com o observado no Quadro 6.5 no que toca ao método da JAE, este é um ponto do traçado que requer uma análise mais cuidada relativamente à homogeneidade.

Note-se que o perfil de velocidades representado na figura anterior (e na subsequente) é efetuado para um condutor aleatório, a partir de parâmetros ótimos obtidos durante a fase de calibração, resultando numa velocidade desejada em reta de aproximadamente 70 km/h (19,47 m/s), *i.e.*, uma velocidade inferior à que advém da aplicação das metodologias anteriores (que apresentam princípios de formulação distintos daqueles associados ao modelo proposto).

6.2.4.2 Trecho de estrada não homogéneo

Na secção 3.2.6.3 foi apresentado um exemplo que resultava numa zona não homogénea, de acordo com a metodologia da atual norma da JAE (1994). Esse exemplo é reproduzido aqui, aplicando o modelo de previsão de perfis de velocidades, assim como o indicador de homogeneidade do traçado L_d . Para efeitos de simulação, foi adicionada uma reta no início e fim do trecho, relativamente ao exemplo indicado na referida secção, admitindo em ambos os casos uma extensão de aproximadamente 300 metros, utilizando, por exemplo, os parâmetros correspondentes ao condutor A. O resultado é o que se apresenta na figura seguinte.

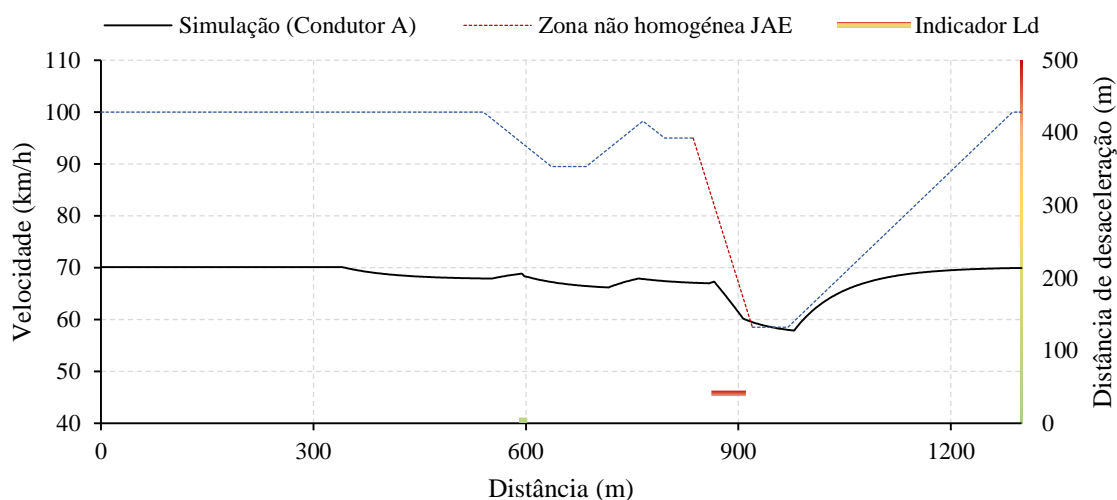


Figura 6.6 – Método proposto aplicado ao trecho heterogéneo

O indicador de homogeneidade L_d , aplicado aos parâmetros comportamentais deste condutor, denota que existe uma zona mais crítica no que diz respeito à homogeneidade, traduzindo-se numa distância de desaceleração de 41 metros até ao ponto de início do elemento curvo. Quando comparada com o diagrama de velocidades específicas da JAE, esta zona corresponde ao mesmo local referido como uma “zona não homogénea”. Desse modo, neste exemplo, o indicador de homogeneidade do traçado é coerente com a metodologia da norma em vigor.

6.3 Considerações finais

Numa fase inicial, que se refere à primeira parte do traçado, o resultado da aplicação do indicador de homogeneidade proposto revelou uma secção que está de acordo com outros indicadores, como seja o Critério II de Lamm e, apesar de não se tratar de uma zona crítica, da totalidade da extensão do segmento de estrada analisado seria aquela que poderia requerer mais atenção no que diz respeito a uma análise de segurança do traçado. Numa segunda fase, optou-se por efetuar uma simulação que originou um perfil de velocidades associado aos parâmetros de um determinado condutor, e os resultados são bastante satisfatórios, isto é, a secção apontada

pelo indicador L_d como potencialmente crítica no que concerne à segurança é também indicada na metodologia da JAE como uma zona que necessita de uma análise mais cuidada do traçado. Assim, pode-se concluir que o indicador L_d é coerente quando comparado com outras metodologias de avaliação da homogeneidade do traçado. Contudo, a sua aplicação advém de um perfil de velocidades que, na sua génese, é formulado de acordo com dados observados de condutores reais, algo que não se verifica nos restantes métodos. Como carece de um maior aprofundamento, é aconselhável que seja utilizado apenas como complemento das restantes metodologias de avaliação da homogeneidade do traçado.

7 Conclusões gerais e desenvolvimentos futuros

7.1 Síntese e conclusões gerais

O conceito de homogeneidade do traçado foi definido como forma de prevenir, ao nível do projeto de execução, a adoção quer de mudanças abruptas nas características geométricas de elementos contíguos quer o uso de combinações de elementos que não respeitem as expectativas naturais dos condutores. As normas de traçado nacionais sugerem metodologias de avaliação da homogeneidade do traçado em estradas interurbanas de faixa de rodagem única baseadas no cálculo de diagramas de velocidades que não refletem o comportamento dos condutores em ambiente real. A verificação individualizada das velocidades nos diferentes elementos do traçado pode, em muitos casos, revelar-se excessivamente restritiva e inadequada para assegurar o conforto e a segurança. Desse modo, é essencial dispor de modelos de estimação de velocidades em função das características prevaletentes da estrada e do comportamento dos condutores.

Nessa linha de ação, o presente estudo teve como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo de previsão de perfis de velocidades para apoio à avaliação da homogeneidade do traçado, tendo-se dado particular realce às componentes de velocidade operacional e de desaceleração.

Ficou claro que os modelos existentes no panorama nacional, por não se basearem em metodologias de recolha de dados contínuos, tendem a sobrestimar as velocidades efetivamente praticadas pelos condutores, e revelam-se inadequados no que respeita ao seu comportamento, assumindo que a aceleração e a desaceleração ocorre apenas nos alinhamentos retos. Desse modo, tem havido uma progressiva preferência pela utilização de modelos que representem de

uma forma credível o comportamento dos condutores, nomeadamente os baseados em recolha de dados contínuos ou em aplicações de simulação microscópica.

Este trabalho de investigação baseou-se nesses dois tipos de modelos e assenta no desenvolvimento de um novo método de avaliação da homogeneidade do traçado. Este método é potenciado por um modelo de previsão de perfis de velocidades que incide na necessidade de prever o comportamento dos condutores através de metodologias inovadoras de recolha e de tratamento de dados e de calibração de parâmetros comportamentais, aplicados às componentes de velocidade operacional e de desaceleração, com o objetivo de definir traçados que não imponham variações significativas nas características de elementos consecutivos.

Nos pontos seguintes sumariza-se o trabalho desenvolvido e apresentam-se as principais conclusões, as quais sintetizam as conclusões mais específicas referidas em cada capítulo.

Capítulo 2

- Elencaram-se alguns conceitos e limitações necessários à aplicação das metodologias abordadas nos capítulos subsequentes, nomeadamente os variados conceitos de velocidade e recomendações normativas respeitantes ao traçado em planta, assim como uma breve referência à distinção entre os termos homogeneidade e consistência do traçado.

Capítulo 3

- Efetuou-se uma pesquisa bibliográfica sobre os modelos de estimação de velocidades, de aceleração e de desaceleração, aplicados a metodologias de avaliação de homogeneidade do traçado, em estradas interurbanas. Verificou-se que, na maioria dos casos, é assumido que a velocidade em curva se mantém constante e que os valores da aceleração e da desaceleração são baseados em valores uniformes que correspondem, nas normas nacionais, a uma ligeira pressão no acelerador e à quase não aplicação dos travões, nos casos da aceleração e da desaceleração, respetivamente;
- Verificou-se que a norma de traçado em vigor propõe um método de avaliação da homogeneidade do traçado muito simplista com base no cálculo de um diagrama de velocidades específicas que apesar de designado como tal é um diagrama misto, utilizando quer uma velocidade específica determinada por critérios de segurança quer uma velocidade do tráfego como representativa da velocidade específica. Propôs-se uma equação que permite determinar a velocidades específica conhecendo apenas o raio da curva circular e um procedimento que permite aplicar uma das limitações impostas ao cálculo do referido diagrama, aplicável quando a extensão dos alinhamentos retos é inferior ao mínimo recomendado, que normalmente resulta em contradições aos pressupostos que servem como elementos básicos à construção desse mesmo diagrama;
- A metodologia proposta pela revisão da norma do traçado, apesar de devidamente fundamentada, engloba várias hipóteses de cálculo que sem a ajuda do programa de cálculo automático desenvolvido pelo LNEC resulta num processo moroso e complexo;

- Concluiu-se que os restantes métodos se apresentam como medidas alternativas válidas de avaliação de segurança e homogeneidade do traçado em estradas interurbanas.

Capítulo 4

- Propôs-se uma nova metodologia de recolha e tratamento de dados para efeitos de modelação do traçado e observação do comportamento do condutor ao longo dos diferentes elementos do traçado, nomeadamente no que respeita à variação da sua velocidade. Esse procedimento implicou: *i*) a utilização de um veículo instrumentado para a recolha de dados numa estrada interurbana com reduzido volume de tráfego; *ii*) a construção de uma base de dados a partir das observações efetuadas em ambiente real; *iii*) a modelação do traçado com recurso ao programa “AutoCAD Civil 3D”; *iv*) a construção de diagramas de curvatura a partir das características geométricas da estrada; *v*) a obtenção dos perfis de velocidades individuais associados à curvatura dos trechos de estrada, por sentido de trânsito.

Capítulo 5

- Foram desenvolvidas equações de estimação da velocidade operacional em curvas, bem como equações de estimação da desaceleração e da aceleração, utilizando o raio das curvas circulares como variável explicativa. Concluiu-se que a velocidade em curva não assume valores constantes, e uma grande parte da desaceleração e da aceleração ocorre dentro dos limites da curva;
- Verificou-se que o modelo de estimação da velocidade, quando comparado com outros modelos, tem tendência a subestimar a velocidade em curva. Contudo, a valor utilizado para desenvolver o modelo resulta da velocidade mínima observada no interior das curvas, contrariamente aos restantes métodos que utilizam valores recolhidos pontualmente, *e.g.*, no ponto médio da curva, o que nem sempre corresponde ao local geométrico onde se verifica a velocidade mínima;
- Com base no modelo de estimação da desaceleração, constatou-se que o valor recomendado pelas normas corresponde a uma curva com um raio igual a 108 metros, sendo previsível que para raios inferiores a esse valor, a adoção do valor fixo de $0,8 \text{ m/s}^2$ sugerido pelas normas nacionais, não permite desacelerar em conforto, podendo mesmo estar em causa os limites da segurança;
- Propôs-se um novo modelo de previsão de perfis de velocidades, tendo por base o modelo de *car-following* de Gipps. O procedimento de calibração e de validação foi efetuado e testado numa estrada interurbana nas proximidades da cidade de Viseu. Os parâmetros envolvidos foram estimados através de um processo de otimização baseado num algoritmo genético. Os resultados indicam que os parâmetros resultantes da calibração são robustos. Concluiu-se que este modelo microscópico de simulação replica satisfatoriamente o comportamento de vários condutores, o que permite a sua aplicação em outras estradas interurbanas com características semelhantes;

- Avaliou-se o potencial da nova metodologia de avaliação da homogeneidade do traçado, aplicada ao modelo de previsão de perfis de velocidades, e os resultados são consistentes com o comportamento de vários condutores.

Capítulo 6

- Foram comparados diversos métodos de avaliação da homogeneidade do traçado, aplicados a um traçado fictício que integra trechos de estrada com traçado homogêneo e outros com traçado heterogêneo, utilizando vários modelos de estimação de diagramas de velocidades;
- O método de avaliação da homogeneidade do traçado, traduzido pelo indicador L_d , revelou-se coerente quando comparado com as outras metodologias de avaliação da homogeneidade do traçado. Contudo, a sua aplicação advém de uma metodologia que, na sua génese, é formulada de acordo com dados observados em ambiente real, algo que não se verifica nos restantes métodos. Desse modo, necessita de um maior aprofundamento e deve ser utilizado apenas como complemento das restantes metodologias de avaliação do traçado.

Em síntese, considera-se que o presente estudo representa um contributo para a melhoria da aplicabilidade dos diversos métodos de avaliação da homogeneidade do traçado em estradas interurbanas, quer ao nível dos modelos tradicionais que tendencialmente cairão em desuso por se basearem em pressupostos e procedimentos desatualizados, quer ao nível dos novos modelos baseados em recolha de dados contínuos e de modelos de microssimulação, que acabarão por ter uma influência cada vez maior na análise e dimensionamento de infraestruturas rodoviárias, particularmente no que diz respeito ao conforto e segurança dos condutores em geral.

7.2 Desenvolvimentos futuros

Face à diversidade de fatores e variáveis envolvidas, tanto nos métodos de avaliação da homogeneidade do traçado, como nos modelos de previsão de perfis de velocidades, e naturalmente nos modelos de estimação de velocidades, de aceleração e de desaceleração, que de uma certa forma complementam os anteriores, permanece em aberto o desenvolvimento de trabalhos complementares.

Apresentam-se de seguida algumas linhas de pesquisa que, no decorrer deste trabalho de investigação, não foram totalmente abordadas ou resolvidas, e que poderão potenciar trabalhos adicionais de investigação:

- A modelação das equações de estimação da velocidade operacional, da aceleração e da desaceleração teve por base uma amostra relativamente reduzida e com pouca variabilidade geométrica, pelo que seria relevante estudar outros trechos com características geométricas mais abrangentes, ampliando desse modo o âmbito de aplicação;
- Como se verificou, alguns métodos de avaliação da homogeneidade do traçado, associados à estimação de diagramas de velocidades, apresentam vários procedimentos de cálculo que dificultam a tarefa do utilizador. Nesse sentido, e relativamente ao método proposto, será

importante prever uma aplicação de cálculo que apresente uma interface simples e de fácil utilização, para distribuição livre, que permita efetuar a avaliação da homogeneidade de um traçado, incluindo a previsão de perfis de velocidades e análise das secções críticas;

- O modelo de previsão de perfis de velocidades apresentado no Capítulo 5, baseado no modelo de *car-following* de Gipps, foi calibrado numa determinada estrada interurbana e testado em situações relativamente “desconhecidas”. Apesar dos resultados se terem revelado satisfatórios, será necessário validar o modelo em outras estradas interurbanas que apresentem características geométricas e de operação distintas, assim como efetuar a sua calibração para um número de condutores mais alargado, de modo a criar uma base de dados que possa contemplar diferentes gamas de condutores que apresentem parâmetros comportamentais diferenciados;
- O indicador de homogeneidade do traçado (L_d) proposto no Capítulo 5 quantifica a distância de desaceleração de um determinado condutor na aproximação a uma curva e avalia as secções que se podem considerar como críticas no que diz respeito à homogeneidade do traçado. Apesar de este indicador permitir explicar a influência que a distância de desaceleração pode apresentar na decisão da escolha das secções críticas na análise da homogeneidade do traçado, verificou-se que os resultados são condicionados por alguns parâmetros comportamentais dos condutores. A aplicabilidade prática desta metodologia passa assim por desenvolver limites de homogeneidade, que permitam desenvolver margens de segurança associadas a cada condutor (ou gama de condutores), aumentando assim a sua potencialidade para a avaliação das condições de segurança em elementos contíguos do traçado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. (1994). *A policy on geometric design of highways and streets*. 1994 Edition. Washington, D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2010). *Highway safety manual (HSM)*. 1st Edition. Washington, D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.
- AASHTO. (2011). *A policy on geometric design of highways and streets*. 6th Edition. Washington, D.C., American Association of State Highway and Transportation Officials.
- Alexander, G. J., Lunenfeld, H. (1986). *Driver expectancy in highway design and traffic operations*. Report No. FHWA-TO-86-1. U.S. Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration.
- Ambros, J., Valentová, V., Oríšek, P. (2015). *Safety ranking of rural curves based on design consistency measures*. 5th International Symposium on Highway Geometric Design, Vancouver, Canada.
- Bella, F. (2008). *Assumption of operating speed-profile models on deceleration and acceleration rates - Verification in the driving simulator*. Transportation Research Board 87th Annual Meeting, Washington, D.C.
- Branco, F. E. F., Picado-Santos, L., Dias Capitão, S. (2001). *Vias de comunicação*. Elemento de apoio à disciplina «Vias de Comunicação», Edição de 2000/2001, Vol. 1. Universidade de Coimbra, FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.
- Cafiso, S., Cerni, G. (2012). *New approach to defining continuous speed profile models for two-lane rural roads*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2309. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 157-167. <http://dx.doi.org/10.3141/2309-16>.
- Camacho-Torregrosa, F. J., Pérez-Zuriaga, A. M., Campoy-Ungría, J. M., García-García, A. (2013). *New geometric design consistency model based on operating speed profiles for road safety evaluation*. Accident Analysis and Prevention, Vol. 61. Elsevier Ltd., pp. 33-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aap.2012.10.001>.
- Cardoso, J. L. (1996). *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. Lisboa, IST - Instituto Superior Técnico.
- Cardoso, J. L. (1999). *Fatores de dimensionamento físico da via*. Elemento de apoio ao curso «Segurança e Gestão Viária Urbana», Tema 6. Prevenção Rodoviária Portuguesa, LNEC, Lisboa.

Cardoso, J. L. (2004). *Homogeneidade de traçado de estradas interurbanas*. Elemento de apoio ao curso «Segurança e homogeneidade do traçado de estradas. Método para aplicação no projeto e na sinalização de curvas em planta». LNEC, Lisboa.

Collins, K., Krammes, R. (1996). *Preliminary validation of a speed-profile model for design consistency evaluation*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1523. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 11-21. <http://dx.doi.org/10.3141/1523-02>.

FGSV. (1995). *Richtlinien fuer die anlage von strassen - Linienfuehrung (RAS-L)*. Cologne, Germany, Forschungsgesellschaft fuer Strassen- und Verkehrswesen.

Fitzpatrick, K., Carlson, P., Brewer, M. A., Wooldridge, M. D., Miaou, S.-P. (2003). *Design speed, operating speed, and posted speed practices*. NCHRP Report 504. TRB - Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.

Fitzpatrick, K., Collins, J. (2000). *Speed-profile model for two-lane rural highways*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1737. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 42-49. <http://dx.doi.org/10.3141/1737-06>.

Fitzpatrick, K., Elefteriadou, L., Harwood, D. W., Collins, J. M., McFadden, J., Anderson, I. B., Krammes, R. A., Irizarry, N., Parma, K. D., Bauer, K. M., Passetti, K. (2000b). *Speed prediction for two-lane rural highways*. Report No. FHWA-RD-99-174. Texas Transportation Institute, U.S. Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration.

Fitzpatrick, K., Wooldridge, M. D., Tsimhoni, O., Collins, J. M., Green, P., Bauer, K. M., Parma, K. D., Koppa, R., Harwood, D. W., Anderson, I., Krammes, R. A., Poggioli, B. (2000a). *Alternative design consistency rating methods for two-lane rural highways*. Report No. FHWA-RD-99-172. Texas Transportation Institute, U.S. Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration.

Gibreel, G., Easa, S., El-Dimeery, I. (2001). *Prediction of operating speed on three-dimensional highway alignments*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 127(1). ASCE - American Society of Civil Engineers, pp. 21-30. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2001\)127:1\(21\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2001)127:1(21)).

Gibreel, G. M., Easa, S. M., Hassan, Y., El-Dimeery, I. A. (1999). *State of the art of highway geometric design consistency*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 125(4). ASCE - American Society of Civil Engineers, pp. 305-313. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(1999\)125:4\(305\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(1999)125:4(305)).

Gipps, P. G. (1981). *A behavioural car-following model for computer simulation*. Transportation Research Part B - Methodological, Vol. 15(2). Elsevier Ltd., pp. 105-111. [http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615\(81\)90037-0](http://dx.doi.org/10.1016/0191-2615(81)90037-0).

- Glennon, J. C., Harwood, D. W. (1978). *Highway design consistency and systematic design related to highway safety*. Transportation Research Record, Vol. 681. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 77-88.
- Hassan, Y. (2004). *Highway design consistency - Refining the state of knowledge and practice*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1881. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 63-71. <http://dx.doi.org/10.3141/1881-08>.
- Highways Agency. (2002). *Design manual for roads and bridges (DMRB)*. Road Geometry, Section 1 - Links, Vol. 6. DFT - Department for Transport, London, TSO - The Stationery Office.
- Homburger, W. S., Kell, J. H. (1989). *Fundamentals of traffic engineering*. 12th Edition. Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Hummer, J. E., Rasdorf, W., Findley, D. J., Zegeer, C. V., Sundstrom, C. A. (2010). *Curve collisions - Road and collision characteristics and countermeasures*. Journal of Transportation Safety and Security, Vol. 2(3). Taylor and Francis, pp. 203-220. <http://dx.doi.org/10.1080/19439961003734880>.
- InIR. (2010). *Norma de traçado - Revisão*. Documento Base. Disposições Normativas, Instituto de Infraestruturas Rodoviárias.
- JAE. (1978). *Normas de projeto (JAE P3/78)*. Almada, Portugal, Junta Autónoma de Estradas.
- JAE. (1994). *Norma de traçado (JAE P3/94)*. Almada, Portugal, Junta Autónoma de Estradas.
- Kanellaidis, G., Golias, J., Efstathiadis, S. (1990). *Driver's speed behavior on rural road curves*. Traffic Engineering and Control, Vol. 31(7/8). London, England, Printerhall Limited, pp. 414-415.
- Koeppel, G., Bock, H. (1970). *Curvature change rate, consistency, and driving speed*. Road and Interstate (Strasse und Autobahn), Vol. 8. Germany.
- Krammes, R. A., Brackett, R. Q., Shafer, M. A., Ottesen, J. L., Anderson, I. B., Fink, K. L., Collins, K. M., Pendleton, O. J., Messer, C. J. (1995). *Horizontal alignment design consistency for rural two-lane highways*. Report No. FHWA-RD-94-034. Texas Transportation Institute, U.S. Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration.
- Lamm, R., Choueiri, E. M., Hayward, J. C., Paluri, A. (1988). *Possible design procedure to promote design consistency in highway geometric design on two-lane rural roads*. Transportation Research Record, Vol. 1195. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 111-122.
- Lamm, R., Psarianos, B., Choueiri, E. M., Soilemezoglou, G. (1998). *A practical safety approach to highway geometric design international case studies - Germany, Greece, Lebanon, and the United States*. Transportation Research Circular No. E-C003. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board.

Lamm, R., Psarianos, B., Mailaender, T. (1999). *Highway design and traffic safety engineering handbook*. McGraw-Hill.

Leisch, J. E., Leisch, J. P. (1977). *New concepts in design-speed application*. Transportation Research Record, Vol. 631. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 4-14.

LNEC. (1973). *Terminologia rodoviária - Traçado*. Especificação LNEC E 283. Documentação Normativa, Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

Lobo, A., Jacques, M., Rodrigues, C., Couto, A. (2011). *Free-gap evaluation for two-lane rural highways*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2223. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 9-17. <http://dx.doi.org/10.3141/2223-02>.

Lobo, A., Rodrigues, C., Couto, A. (2013). *Free-flow speed model based on portuguese roadway design features for two-lane highways*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2348. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 12-18. <http://dx.doi.org/10.3141/2348-02>.

Macedo, A. L., Cardoso, J. L. (2010a). *Apoio à revisão da norma de traçado. Proposta de conteúdo relativo a segurança e homogeneidade do traçado em estradas de faixa de rodagem única*. Nota técnica 3/2010 - DT - NPTS. LNEC, Lisboa.

Macedo, A. L., Cardoso, J. L. (2010b). *Apoio à revisão da norma de traçado. Proposta de equações para estimativa da velocidade do tráfego em curva*. Nota técnica 1/2010 - DT - NPTS. LNEC, Lisboa.

Marchionna, A., Perco, P. (2008). *Operating speed-profile prediction model for two-lane rural roads in the italian context*. Advances in Transportation Studies, Vol. 14. Italy, University Roma Tre, pp. 57-68.

MathWorks, T. (2004). *Genetic algorithm and direct search toolbox for use with MATLAB® - User's guide*. Version 1. The MathWorks, Inc.

McFadden, J., Elefteriadou, L. (2000). *Evaluating horizontal alignment design consistency of two-lane rural highways - Development of new procedure*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1737. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 9-17. <http://dx.doi.org/10.3141/1737-02>.

McLean, J. (1981). *Driver speed behaviour and rural road alignment design*. Traffic Engineering and Control, Vol. 22(4). London, England, Printerhall Limited, pp. 208-211.

Melo, P., Lobo, A., Couto, A., Rodrigues, C. (2012). *Road cross-section width and free-flow speed on two-lane rural highways*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2301. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 28-35. <http://dx.doi.org/10.3141/2301-04>.

- Messer, C. J. (1980). *Methodology for evaluating geometric design consistency*. Transportation Research Record, Vol. 757. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 7-14.
- Messer, C. J., Mounce, J. M., Brackett, R. Q. (1981). *Highway geometric design consistency related to driver expectancy - Procedures for determining geometric design consistency*. Report No. FHWA-RD-81-037, Vol. III. Texas Transportation Institute, U.S. Department of Transportation, FHWA - Federal Highway Administration.
- Misaghi, P., Hassan, Y. (2005). *Modeling operating speed and speed differential on two-lane rural roads*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 131(6). ASCE - American Society of Civil Engineers, pp. 408-418. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2005\)131:6\(408\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2005)131:6(408)).
- Moreira, A. M. P. (2000). *Avaliação de traçados rodoviários*. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Morrall, J. F., Talarico, R. J. (1994). *Side friction demanded and margins of safety on horizontal curves*. Transportation Research Record, Vol. 1435. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 145-152.
- Ng, J. C. W., Sayed, T. (2004). *Effect of geometric design consistency on road safety*. Canadian Journal of Civil Engineering, Vol. 31(2). NRC Research Press, pp. 218-227. <http://doi.org/10.1139/103-090>.
- Nie, B., Hassan, Y. (2007). *Modeling driver speed behavior on horizontal curves of different road classifications*. Transportation Research Board 86th Annual Meeting, Washington, D.C.
- Ottesen, J., Krammes, R. (2000). *Speed-profile model for a design-consistency evaluation procedure in the United States*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1701. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 76-85. <http://dx.doi.org/10.3141/1701-10>.
- Passetti, K., Fambro, D. (1999). *Operating speeds on curves with and without spiral transitions*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1658. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 9-16. <http://dx.doi.org/10.3141/1658-02>.
- Pérez-Zuriaga, A. M., Camacho-Torregrosa, F. J., García-García, A. G. (2013). *Tangent-to-curve transition on two-lane rural roads based on continuous speed profiles*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 139(11). ASCE - American Society of Civil Engineers, pp. 1048-1057. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000583](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000583).
- Pérez-Zuriaga, A. M., García-García, A., Camacho-Torregrosa, F. J. (2011). *Study of tangent-to-curve transitions on two-lane rural roads with continuous speed profiles*. Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington, D.C.

Pérez-Zuriaga, A. M., García-García, A., Camacho-Torregrosa, F. J., D'Attoma, P. (2010). *Modeling operating speed and deceleration on two-lane rural roads with Global Positioning System data*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2171. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 11-20. <http://dx.doi.org/10.3141/2171-02>.

Polus, A., Fitzpatrick, K., Fambro, D. (2000). *Predicting operating speeds on tangent sections of two-lane rural highways*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1737. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 50-57. <http://dx.doi.org/10.3141/1737-07>.

Polus, A., Mattar-Habib, C. (2004). *New consistency model for rural highways and its relationship to safety*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 130(3). ASCE - American Society of Civil Engineers, pp. 286-293. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-947X\(2004\)130:3\(286\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-947X(2004)130:3(286)).

Pratt, M., Bonneson, J. (2009). *Assessment of traffic control device selection guidelines for horizontal curves*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 2122. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 36-44. <http://dx.doi.org/10.3141/2122-05>.

Rogers, M. (2003). *Highway Engineering*. 1st Edition. Department of Civil and Structural Engineering, Dublin Institute of Technology, Ireland, Wiley-Blackwell.

Roque, C. A. (2013). *Revisão da norma de traçado*. VII Congresso Rodoviário Português. LNEC, Lisboa, CRP - Centro Rodoviário Português.

Russo, F., Mauro, R., Dell'Acqua, G. (2012). *Rural highway design consistency evaluation model*. SIV-5th International Congress - Sustainability of Road Infrastructures. Procedia - Social and Behavioral Sciences, Vol. 53. Elsevier Ltd., pp. 952-960. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.944>.

TRB. (2010). *Highway capacity manual (HCM2010)*. 5th Edition. Washington, D.C., Transportation Research Board of the National Academies.

TRB. (2011). *Modeling operating speed - Synthesis report*. Transportation Research Circular No. E-C151. Washington, D.C., Transportation Research Board.

Vasconcelos, A. L. P. (2014). *Avaliação do desempenho operacional de rotundas - Modelos e aplicações*. Dissertação de Doutoramento. Coimbra, FCTUC - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Wooldridge, M. D., Fitzpatrick, K., Harwood, D. W., Potts, I. B., Elefteriadou, L., Torbic, D. J. (2003). *Geometric design consistency on high-speed rural two-lane roadways*. NCHRP Report 502. TRB - Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C.

Wright, P. H., Paquette, R. J. (1987). *Highway engineering*. 5th Edition. New York, John Wiley and Sons.

Ye, Q., Tarko, A., Sinha, K. (2001). *Model of free-flow speed for Indiana arterial roads*. Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board, Vol. 1776. Washington, D.C., TRB - Transportation Research Board, pp. 189-193. <http://dx.doi.org/10.3141/1776-24>.

APÊNDICES

Apêndice A	Análise comparativa dos valores da distância de transição do método da JAE (ábaco, equação simplificada e equação exata)
Apêndice B	Procedimento para o cálculo da VE em alinhamentos retos que apresentam uma extensão inferior ao limite mínimo recomendado pela norma da JAE
Apêndice C	Análise comparativa entre as equações de estimação da velocidade de circulação não impedida do método do InIR
Apêndice D	Outros modelos existentes na literatura internacional
Apêndice E	Modelação do traçado através da ferramenta “AutoCAD Civil 3D”
Apêndice F	Diagramas de curvatura do segmento da EN 231 (trechos 1 e 2)
Apêndice G	Características geométricas do segmento de estrada da EN 231 após divisão em elementos retos e curvos (trechos 1 e 2)
Apêndice H	Análise de regressão linear (velocidade, desaceleração e aceleração)
Apêndice I	Análise comparativa das equações de estimação da velocidade operacional que utilizam o raio como variável explicativa com a equação proposta
Apêndice J	Análise comparativa das equações de estimação da desaceleração que utilizam o raio como variável explicativa com a equação proposta
Apêndice K	Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps
Apêndice L	Resultados do cálculo dos parâmetros necessários à construção dos diagramas de velocidades

Apêndice B – Procedimento para o cálculo da VE em alinhamentos retos que apresentam uma extensão inferior ao limite mínimo recomendado pela norma da JAE

Como estipulado na secção 3.2.6.3, nos alinhamentos retos a velocidade específica deverá ser igual à velocidade do tráfego, desde que a sua extensão seja superior à mínima recomendada pela norma (JAE, 1994), caso contrário adotar-se-á a menor das velocidades específicas das curvas que delimitam o alinhamento reto, *i.e.*, $VE = \text{mín}(VE_1; VE_2)$. Esta limitação resulta em algumas contradições dos pressupostos que servem como elementos básicos à construção do diagrama de velocidades específicas. Uma possibilidade seria que nestas situações fosse aplicada a maior das velocidades específicas que delimitam as curvas, evitando assim contradizer alguns dos princípios básicos ao cálculo do referido diagrama. Contudo, as recomendações da norma não englobam outras hipóteses. Então, decorrente da análise exposta na secção 3.2.6.4, é aconselhável que esta limitação seja aplicada apenas em casos excepcionais.

Apresenta-se de seguida um procedimento para determinar a VE em alinhamentos retos que apresentam uma extensão inferior à mínima recomendada pela norma. Inicialmente, determina-se o $L_{\text{mín}}$ de acordo com o Quadro 2.5, em função da VB, e averigua-se quais das secções do trecho se encontram dentro deste caso (*i.e.*, $L < L_{\text{mín}}$). Para efeitos de cálculo considera-se os pontos de fim da curva precedente, *i.e.*, início da aceleração, doravante denotado por (x_1, y_1) , e de início da curva subsequente, *i.e.*, fim da desaceleração, doravante denotado por (x_4, y_4) , como indicado na figura seguinte.

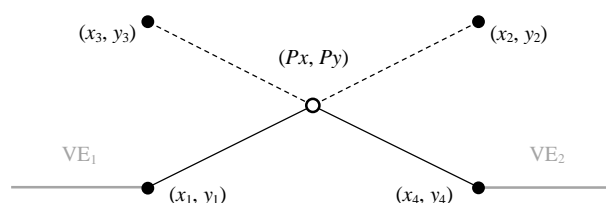


Figura B.1 – Exemplo ilustrativo da interseção de dois segmentos de reta L_1 e L_2

Hipótese 1

Admitindo que a VE na reta (e consequentemente nas curvas de transição) é igual à VT (não aplicando assim a limitação referida pela norma):

- i) Determina-se a DT_1 e DT_2 de acordo com a Figura 3.3 da secção 3.2.6.2, aplicando a equação (3.2) da secção 3.2.5.1;
- ii) Considera-se o segmento de reta L_1 que une o ponto (x_1, y_1) com o ponto (x_2, y_2) , onde $x_2 = x_1 + DT_1$ e $y_2 = VT$, e o segmento de reta L_2 que une o ponto (x_4, y_4) com o ponto (x_3, y_3) , onde $x_3 = x_4 - DT_2$ e $y_3 = VT$;
- iii) Determina-se o ponto de interseção (P_x, P_y) dos segmentos de reta L_1 e L_2 através da equação (B.1), definida usando determinantes, e efetua-se a seguinte verificação:

- Se existir interseção que respeite as condições $Px > x_1$ e $Px < x_4$, não é necessário aplicar a limitação e estão presentes os casos *a*) e *b*) da Figura 3.3 (se $Py > VT$), ou o caso *c*) da referida figura (se $Py < VT$). Deste modo, é possível ao condutor acelerar e desacelerar em segurança até ao elemento seguinte;
- Se as condições anteriores não forem respeitadas, a interseção acontece fora dos limites das zonas de aceleração e de desaceleração e poderá existir uma zona não homogénea (considerar a hipótese seguinte).

$$(Px, Py) = \left(\begin{array}{l} \frac{(x_1 y_2 - y_1 x_2)(x_3 - x_4) - (x_1 - x_2)(x_3 y_4 - y_3 x_4)}{(x_1 - x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_4)}, \\ \frac{(x_1 y_2 - y_1 x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 y_4 - y_3 x_4)}{(x_1 - x_2)(y_3 - y_4) - (y_1 - y_2)(x_3 - x_4)} \end{array} \right) \quad (\text{B.1})$$

Hipótese 2

Admitindo que a VE na reta respeita a limitação anteriormente referida, *i.e.*, $VE = \text{mín}(VE_1; VE_2)$, e verificando-se que não é possível aplicar a hipótese anterior:

- i)* Determina-se a distância de transição DT_1 ou DT_2 associada à nova VE da reta, considerando que só é possível existir zona de aceleração ou zona de desaceleração, como representado na Figura B.2;

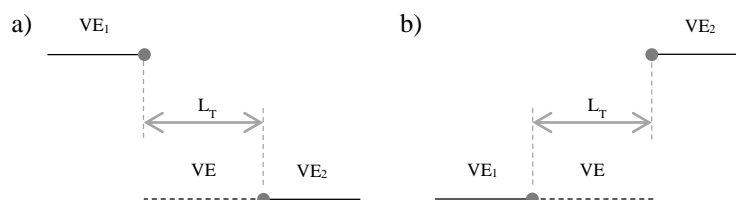


Figura B.2 – Casos possíveis: a) zona de desaceleração; b) zona de aceleração

- ii)* No caso *a*) da figura anterior, para que seja possível desacelerar em segurança partindo da curva precedente, é necessário que $DT_2 < LT$, onde L_T corresponde à extensão da reta e das curvas de transição. Caso esta condição se verifique, o condutor inicia a desaceleração imediatamente após sair da curva até à reta, ou no limite até ao ponto de início da curva seguinte, em segurança; caso não se verifique, trata-se de uma zona não homogénea;
- iii)* No caso *b*) da figura anterior, o condutor admite uma velocidade constante à saída da curva e para que seja possível acelerar em segurança até à curva seguinte, é necessário que $DT_1 < LT$, onde L_T corresponde à extensão da reta e das curvas de transição. Caso esta condição não se verifique, trata-se de uma zona não homogénea.

Hipótese 3

No caso de VE_1 (curva anterior) ou VE_2 (curva subsequente) ser igual à VT , *e.g.*, a curva apresenta uma curvatura reduzida, a hipótese 1 não se coloca. Desse modo, a análise deve ser efetuada de forma análoga à hipótese 2, verificando assim se é possível ao condutor desacelerar ou acelerar em segurança até ao elemento seguinte.

A possibilidade de adotar a máxima VE das curvas que delimitam o alinhamento reto, como referido no parágrafo introdutório, prende-se apenas com o comportamento do condutor, nomeadamente no que diz respeito às hipóteses 2 e 3. Convém referir que, independentemente de ser adotado o mínimo ou o máximo, esta decisão não influencia a eventualidade de existir uma zona não homogénea, *i.e.*, a DT associada será a mesma em ambos os casos. Desse modo, a única diferença em adotar a maior das velocidades específicas das curvas que delimitam o alinhamento reto, em detrimento da recomendação da norma, seria que o condutor, por exemplo, numa situação de desaceleração, *i.e.*, caso *a*) da figura anterior, não iniciaria a desaceleração no fim da curva anterior, mas sim, manteria a velocidade constante até ao ponto de transição (se fosse possível, *i.e.*, poderia acontecer que a DT tomasse o mesmo valor que L_T ou um valor superior no caso de uma zona não homogénea) e só então iniciava a desaceleração. No caso *b*) o procedimento seria análogo, mas para uma situação de aceleração. Portanto, neste caso, os pressupostos do diagrama não seriam alterados, à semelhança do que se verifica no diagrama da Figura 3.7 onde a VE da primeira curva é igual à VT , por apresentar uma curvatura reduzida, e nesse caso o condutor mantém a velocidade constante até ao ponto de transição e só nessa altura inicia a redução de velocidade.

Apêndice C – Análise comparativa entre as equações de estimação da velocidade de circulação não impedida do método do InIR

Na secção 3.3.6 são indicados dois grupos de equações para o cálculo das velocidades de circulação não impedida no método do InIR (2010). Para efeitos de aplicação em projetos de novas estradas, os valores das variáveis explicativas que constam nas equações do método em referência são suscetíveis de serem obtidos diretamente durante o cálculo do traçado, não se prevendo dificuldades na obtenção das mesmas; no caso de remodelação de estradas existentes, igual situação se verificará, uma vez que, habitualmente, é necessário o cálculo de novas diretriz e rasante. No entanto, em casos de aplicação em estradas existentes, é possível que haja alguma dificuldade em obter os valores de todas as variáveis explicativas. Neste último caso, é possível recorrer a equações simplificadas; contudo, deve ter-se atenção que tal simplificação diminuirá o rigor dos resultados da análise efetuada. Assim, é feita uma análise comparativa entre as equações simplificadas indicadas na secção 3.3.6.1 e a equação do método em referência indicada na secção 3.3.6.2 para várias velocidades de aproximação e diferentes larguras de faixa de rodagem. Foram obtidas as seguintes relações com a equação (3.8) do método em referência: equação simplificada (3.5) e largura de faixa de rodagem igual a 7,5 m (Figura C.1); equação simplificada (3.6) e largura de faixa de rodagem igual a 7,0 m (Figura C.2); equação simplificada (3.7) e largura de faixa de rodagem igual a 6,0 m (Figura C.3). Esta análise permite dar uma noção do erro expectável quando se utilizam as equações simplificadas em detrimento da equação do método em referência para estradas de faixa de rodagem única.

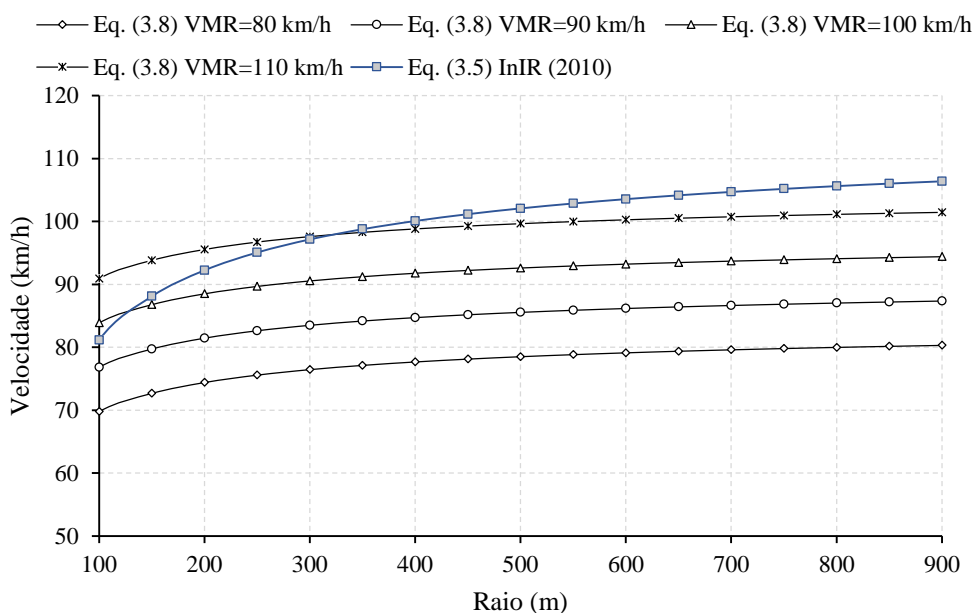


Figura C.1 – Relação entre a equação (3.5) e a equação (3.8) do método do InIR (2010) para várias velocidades de aproximação e largura da faixa de rodagem igual a 7,5 metros

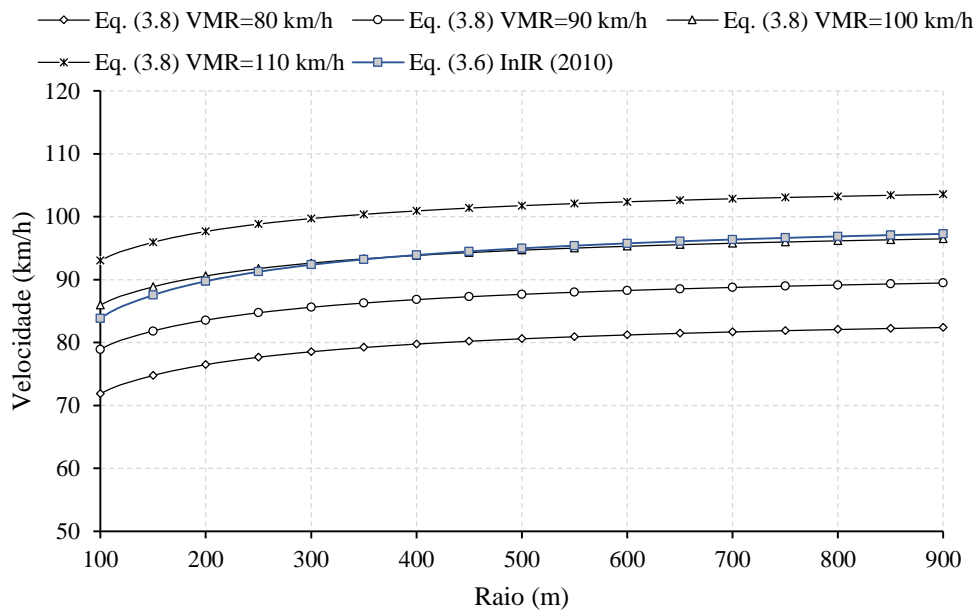


Figura C.2 – Relação entre a equação (3.6) e a equação (3.8) do método do InIR (2010) para várias velocidades de aproximação e largura da faixa de rodagem igual a 7,0 metros

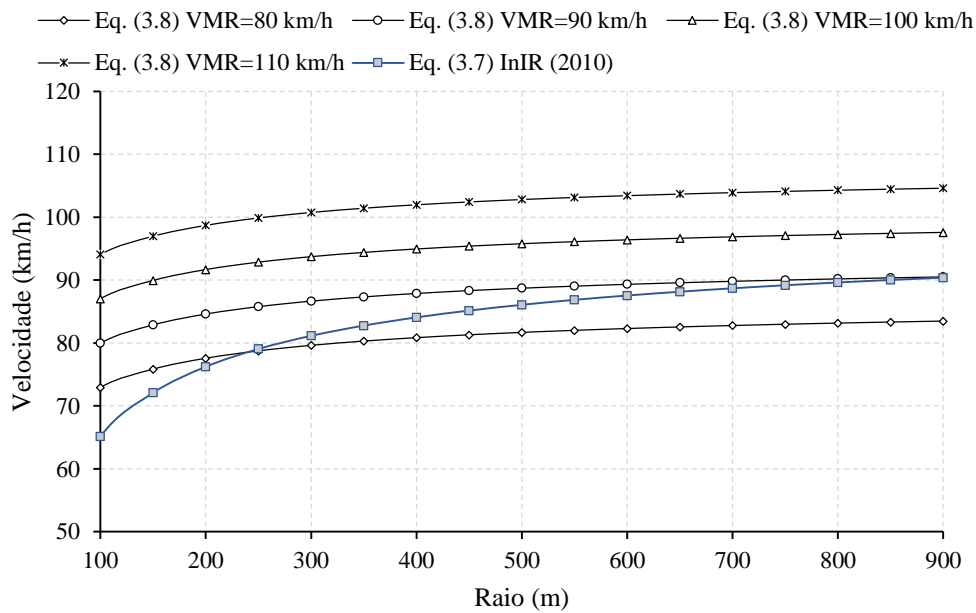


Figura C.3 – Relação entre a equação (3.7) e a equação (3.8) do método do InIR (2010) para várias velocidades de aproximação e largura da faixa de rodagem igual a 6,0 metros

Apêndice D – Outros modelos existentes na literatura internacional

D.1 Modelo de estimação da *FFS* pelo HCM

Numa outra perspetiva, e sempre que não sejam possíveis medições em ambiente real, o HCM (TRB, 2010) propõe um modelo de estimação da velocidade livre de circulação (*FFS*) que reflete o efeito de redução da *BFFS*, *i.e.*, a *FFS* de “base”, ou de referência, em função das características geométricas da estrada e da densidade de pontos de acesso (*e.g.*, cruzamentos e entroncamentos), indicado na equação seguinte:

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

onde *FFS* é a velocidade de circulação em regime livre (km/h), *BFFS* é a velocidade de circulação em regime livre de referência (km/h), f_{LS} é o parâmetro de ajustamento devido à largura da via e da berma (km/h), e f_A é o parâmetro de ajustamento devido à densidade de pontos de intersecção (km/h). Esta expressão traduz a influência que um conjunto de fatores (*e.g.*, largura das vias, largura das bermas e densidade de acessos) exerce na redução da *FFS* obtida em condições referenciais: largura das vias e largura das bermas iguais ou superiores a 3,6 m e 1,8 m, respetivamente, e inexistência de pontos de acesso à estrada. Caso não seja possível observar a variável *BFFS* numa estrada similar que reúna as condições de referência, poderá ser necessário utilizar uma estimativa, suportada pela experiência e pela ponderação de uma série de fatores. Estudos realizados sobre as condições de circulação em estradas dos Estados Unidos indicam que a velocidade livre de circulação nas condições de referência excede em 11 km/h o limite legal, quando este está compreendido entre 65 km/h e 70 km/h, e em 8 km/h quando está compreendido entre 80 km/h e 90 km/h. Note-se que, ao contrário das metodologias aplicáveis a elementos específicos do traçado (retas e curvas), a metodologia do HCM (TRB, 2010) é usada para troços de estrada na sua totalidade.

O conceito de *BFFS* corresponde à velocidade expectável baseada nas características geométricas da estrada desde que as larguras de referência se verifiquem e não existam quaisquer pontos de acesso, como referido anteriormente. Então, a velocidade base (ou velocidade de projeto) poderá ser um parâmetro aceitável para representar a *BFFS*, uma vez que aquela é, basicamente, representativa das características geométricas da estrada (TRB, 2010). O primeiro ajustamento à velocidade livre de circulação está relacionado com a largura da via e das bermas e é o indicado no quadro seguinte.

Quadro D.1 – Redução da *FFS* devido à largura das vias e das bermas (f_{LS}) (adaptado de TRB, 2010)

Largura da via (L_V) (m)	Redução da <i>FFS</i> (km/h)			
	Largura da berma (L_B) (m)			
	$0,0 \leq L_B < 0,6$	$0,6 \leq L_B < 1,2$	$1,2 \leq L_B < 1,8$	$L_B \geq 1,8$
$2,7 \leq L_V < 3,0$	10,3	7,7	5,6	3,5
$3,0 \leq L_V < 3,3$	8,5	5,9	3,8	1,7
$3,3 \leq L_V < 3,6$	7,5	4,9	2,8	0,7
$L_V \geq 3,6$	6,8	4,2	2,1	0,0

Melo *et al.* (2012) estudaram a redução da *FFS* em estradas portuguesas, e os resultados obtidos são inferiores aos apresentados pelo manual norte-americano. O HCM (TRB, 2010) foi desenvolvido para as condições norte-americanas e a sua aplicabilidade em estradas com diferentes características geométricas e envolvente (*e.g.*, estradas em Portugal e outros países europeus) deve ser cuidadosamente considerada. O resultado do seu estudo em estradas com velocidade base de 80 km/h é apresentado no quadro seguinte.

Quadro D.2 - Redução da *FFS* devido à largura das vias e das bermas (f_{LS}) (Melo *et al.*, 2012)

Largura da via (L_V) (m)	Redução da <i>FFS</i> (km/h)				
	Largura da berma (L_B) (m)				
	$0,0 \leq L_B < 0,3$	$0,3 \leq L_B < 0,8$	$0,8 \leq L_B < 1,2$	$1,2 \leq L_B < 1,8$	$L_B \geq 2,2$
$2,7 \leq L_V < 3,0$	9,9	5,4	3,4	1,5	0,5
$3,0 \leq L_V < 3,3$	6,7	3,4	2,1	0,7	-
$3,3 \leq L_V < 3,6$	3,7	1,7	0,8	-	-
$L_V \geq 3,6$	0,9	0,0	-	-	-

A secção de referência, no caso do estudo efetuado por Melo *et al.* (2012), apresenta valores diferentes para a largura das vias e largura das bermas, de 3,6 m e 0,8 m, respetivamente. Consequentemente, as reduções de velocidade determinadas para pequenas larguras de vias e bermas são diferentes dos valores indicados no HCM (TRB, 2010). O valor que mais se aproxima do manual norte-americano é o indicado para a menor largura da via e da berma.

O ajustamento em função da densidade de acessos à estrada em estudo, de acordo com o HCM (TRB, 2010) é indicado no quadro seguinte.

Quadro D.3 – Redução da *FFS* devido à densidade de interseções (f_A) (adaptado de TRB, 2010)

Acessos/km	Redução da <i>FFS</i> (km/h)
0	0,0
6	4,0
12	8,0
18	12,0
≥ 24	16,0

A densidade de pontos de acesso é calculada dividindo o número total de interseções (mesmo aquelas que não estão sinalizadas, *e.g.*, acessos a garagens e acessos locais) em ambos os sentidos de circulação pela extensão do troço de estrada, em quilómetros. Ou seja, a estimacão da *FFS* terá o mesmo valor para os dois sentidos de circulação; no caso de outros modelos, ou em observações de campo, o valor da velocidade poderá ser diferente em cada sentido de circulação. Sempre que o troço de estrada apresente curvas com raios muito reduzidos e com variações de velocidade substanciais, é aconselhável que a *FFS* seja determinada analisando cada elemento em separado (retas e curvas), e posteriormente calcular a *FFS* do troço através de uma média ponderada (TRB, 2010).

Em países europeus como Portugal, as velocidades de circulação em estradas de duas vias podem variar consideravelmente de uma estrada para a outra, originando velocidades inferiores

às praticadas nos Estados Unidos. Desse modo, é de esperar que, para as mesmas características de perfil transversal, as reduções de velocidade em estradas europeias sejam também mais reduzidas (Lobo *et al.*, 2013).

D.2 Modelos de estimação da velocidade operacional em elementos curvos

a) Modelo desenvolvido por Morrall e Talarico

O modelo desenvolvido por Morrall e Talarico (1994) no Canadá em estradas rurais de duas vias, após observações em nove curvas com bermas pavimentadas, e com raios entre 290 m e 3490 m, apresenta como variável explicativa o grau de curvatura (DC). Com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,631 é representado pela seguinte expressão:

$$V_{85} = e^{(4,561-0,00586DC)} \quad (D.2)$$

onde V_{85} é a velocidade operacional (km/h), e DC é o grau de curvatura ($^\circ/100$ m de arco). Uma vez que o parâmetro DC é indicado, neste caso, como um grau por 100 unidades de comprimento de arco, através da fórmula que relaciona o raio, o comprimento do arco, e o grau de curvatura, resulta que $DC = 5729,578/R$. Este modelo assume que a velocidade em curva é constante (TRB, 2011).

b) Modelo desenvolvido por Misaghi e Hassan

Ainda no Canadá, Misaghi e Hassan (2005) conduziram uma investigação em estradas rurais de duas vias observando vinte curvas com vários raios e diferentes extensões por forma a determinar um modelo de estimação da velocidade operacional em curvas (TRB, 2011). Uma das equações obtidas, que utiliza o raio como variável explicativa, é a seguinte:

$$V_{85MC} = 91,85 + 0,00981R \quad (D.3)$$

onde V_{85MC} é a velocidade operacional no ponto médio da curva (km/h), e R é o raio da curva circular (m). Este modelo apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,464 e assume que a velocidade em curva é constante. Os autores (Misaghi e Hassan, 2005) desenvolveram ainda um modelo de estimação da variação de velocidades na aproximação à curva, com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,64 (TRB, 2011). O seu cálculo é efetuado através da seguinte equação:

$$\Delta_{85}V = -83,63 + 0,93V_T + e^{(-8,93+3507,1/R)} \quad (D.4)$$

onde $\Delta_{85}V$ é o diferencial da velocidade correspondente ao percentil 85 (km/h), V_T é a velocidade na reta de aproximação à curva (km/h), e R é o raio da curva circular (m). Este $\Delta_{85}V$ é fundamentalmente diferente do diferencial de velocidades que resulta da subtração da

velocidade operacional em elementos sucessivos ($\Delta V_{85} = V_{85i} - V_{85i+1}$). De acordo com os dados recolhidos, Misaghi e Hassan (2005) concluíram que a simples subtração de velocidades na reta de aproximação e na curva subestima o valor real da velocidade operacional (TRB, 2011).

c) Modelo desenvolvido por Passeti e Fambro

Passeti e Fambro (1999) (referido por TRB, 2011) investigaram em vários locais dos Estados Unidos (observando 12 curvas de transição e 39 curvas circulares) o efeito das curvas de transição nas velocidades praticadas em curva pelos condutores, e chegaram ao seguinte modelo:

$$V_{85} = 103,9 - \frac{3020,5}{R} \quad (\text{D.5})$$

onde V_{85} é a velocidade operacional (km/h), e R é o raio da curva circular (m). Este modelo apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,68 e assume que a velocidade em curva é constante. Os autores (Passeti e Fambro, 1999) concluíram que, de acordo com os dados obtidos, as curvas de transição não influenciam significativamente a velocidade a que os condutores de veículos ligeiros circulam quando percorrem uma curva horizontal em estradas rurais de duas vias. No entanto, as curvas de transição poderão afetar a velocidade à medida que o raio da curva diminui. Porém, de acordo com a literatura existente e a investigação de Passeti e Fambro (1999), a inclusão de curvas de transição em curvas horizontais não produz significantes benefícios em termos operacionais em veículos de passageiros (TRB, 2011).

d) Modelo desenvolvido por Fitzpatrick *et al.*

No estudo efetuado por Fitzpatrick *et al.* (2000b), os autores também desenvolveram um modelo para a estimação da V_{85} para veículos ligeiros que circulam em estradas rurais de duas vias. Foram recolhidos dados da velocidade de circulação em 176 locais dos Estados Unidos. O modelo utiliza a curvatura ($1/R$) como característica relevante, ou seja o inverso do raio da curva circular, e duas equações foram desenvolvidas tendo em conta a inclinação longitudinal da estrada onde se inserem as curvas horizontais para limites de $\pm 4\%$. Outros limites foram considerados por Fitzpatrick *et al.* (2000b) estando associados a outras equações; no entanto, estes limites de inclinação longitudinal aqui indicados são aqueles que mais se enquadram no presente estudo. O coeficiente de determinação (R^2) tem o valor de 0,76 para ambas as equações, que se indicam de seguida:

$$V_{85MC} = 105,98 - \frac{3709,90}{R}; \quad -4\% \leq G \leq 0\% \quad (\text{D.6})$$

$$V_{85MC} = 104,82 - \frac{3574,51}{R}; \quad 0\% \leq G \leq 4\% \quad (\text{D.7})$$

onde V_{85MC} é a velocidade operacional no ponto médio da curva (km/h), R é o raio da curva circular (m), e G é a inclinação longitudinal (%). O raio da curva circular foi a única variável independente estatisticamente significativa para prever a V_{85} para todas as combinações que incluíam a curva horizontal e a inclinação longitudinal (*grade*, G). Foi notado pelos autores (Fitzpatrick *et al.*, 2000b) que a velocidade operacional em curvas horizontais é muito semelhante à velocidade praticada em retas quando o raio da curva circular é igual ou superior a 800 m; em curvas com raios inferiores a 250 m, a velocidade operacional desce rapidamente.

e) Modelo desenvolvido por Kanellaidis *et al.*

Outro estudo, este desenvolvido na Grécia por Kanellaidis *et al.* (1990), apurou a relação entre as velocidades operacionais em curvas (recolhendo dados em 58 locais) e os vários parâmetros geométricos do traçado (TRB, 2011). O modelo proposto é o seguinte:

$$V_{85} = 129,88 - \left(\frac{623,1}{\sqrt{R}} \right) \quad (D.8)$$

onde V_{85} é a velocidade operacional (km/h), e R é o raio da curva circular (m).

D.3 Modelos de estimação de velocidade operacional em elementos retos

A estimação da velocidade operacional em curvas poderá ser mais facilitada que a estimação da velocidade em retas, devido ao grande número de variáveis que influenciam a velocidade em reta, e, desse modo, poucos estudos se ocuparam com esta questão. Para além dos modelos anteriormente apresentados no Capítulo 3 para a estimação da velocidade em reta, Polus *et al.* (2000) analisaram a variação da velocidade operacional em 162 trechos retos de estradas rurais de duas vias, em que a velocidade era recolhida com medidores manuais de velocidade (*radar guns* na terminologia anglo-saxónica) e sensores de pavimento. Várias equações foram desenvolvidas para prever a velocidade em reta tendo em conta as características geométricas disponíveis (TRB, 2011). A escolha da equação depende dos raios das curvas que delimitam a reta e da extensão da reta: a equação (D.9) diz respeito a pequenos raios (R_1 e $R_2 \leq 250$ m) e pequenas extensões de retas ($TL \leq 150$ m); a equação (D.10) deve ser escolhida para pequenos raios (R_1 e $R_2 \leq 250$ m) e extensões intermédias de retas ($150 \text{ m} < TL \leq 1000$ m), e para uma velocidade operacional máxima de 105 km/h; a equação (D.11) deve ser usada em retas extensas ($TL > 1000$ m) e para qualquer raio razoável (*i.e.*, nunca inferior ao raio mínimo em função da velocidade base). As equações são as seguintes:

$$V_{85T} = 101,11 - \frac{3420}{GM_s} \quad (D.9)$$

$$V_{85T} = 105 - \frac{28,107}{e^{0,00108GM_L}} \quad (D.10)$$

$$V_{85T} = 105 - \frac{22,953}{e^{0,00012GM_L}} \quad (D.11)$$

onde V_{85T} é a velocidade operacional em reta (km/h), e GM é uma medida geométrica (*geometric measure*) que depende, no caso de GM_S apenas dos raios das curvas circulares que delimitam a reta (m), e no caso de GM_L desses mesmo raios e também da extensão da reta (m²). Estes parâmetros adicionais são calculados pelas seguintes equações:

$$GM_S = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad (D.12)$$

$$GM_L = \frac{TL(R_1 \cdot R_2)^{0,5}}{100} \quad (D.13)$$

onde R_1 e R_2 são os raios da curva anterior e seguinte, respetivamente, que delimitam o alinhamento reto (m), e TL é a extensão da reta (m). No caso da equação (D.10) o parâmetro GM_L deve ser inferior a 1500 m². Os modelos representados pelas duas primeiras expressões (D.9) e (D.10), de acordo com Polus *et al.* (2000), ajustaram-se bem aos dados e podem ser usados para prever a velocidade operacional durante a fase de projeto em estradas rurais de duas vias; no entanto, a terceira equação (D.11) representa um modelo preliminar e necessita de mais dados para melhorar a sua utilidade. Note-se que os modelos aqui indicados representam os modelos designados pelos autores como grupos I, II e IV; o grupo III, que diz respeito ao modelo correspondente a raios superiores a 250 m e a extensões intermédias de retas, não foi indicado devido a uma enorme variabilidade nos dados, que resultou num modelo com um coeficiente de determinação igual a 0,20. Os coeficientes de determinação (R^2) relativos à primeira, segunda e terceira equação são iguais a 0,55, 0,74 e 0,84, respetivamente (TRB, 2011).

D.4 Modelos de estimação da desaceleração e aceleração

Relativamente ao cálculo da desaceleração e da aceleração, Collins e Krammes (1996) testaram a validade de um modelo de avaliação da homogeneidade do traçado recorrendo a perfis de velocidades, incluindo a capacidade de estimação da redução de velocidades e os princípios acerca da desaceleração e da aceleração na entrada e saída de um curva horizontal. Os autores concluíram que o valor de 0,85 m/s² normalmente assumido noutros estudos, *e.g.*, Lamm *et al.* (1999), para a desaceleração na aproximação a uma curva era aceitável, mas que esse valor era sobrestimado na aceleração à saída de uma curva. Assim, indicam-se de seguida alguns modelos desenvolvidos para o cálculo da desaceleração e da aceleração.

a) Modelo desenvolvido por Fitzpatrick *et al.*

Fitzpatrick *et al.* (2000b) apresentaram um modelo que considera o efeito do raio das curvas circulares na aceleração e na desaceleração. Este modelo foi desenvolvido com base nos valores

mínimos e máximos observados nos locais estudados. O modelo de desaceleração resultou de uma regressão linear para curvas com raios superiores a 175 metros, que é indicado na equação (D.14); foi assumido pelos autores que em curvas com raios inferiores a 175 metros a desaceleração é igual a $-1,0 \text{ m/s}^2$, e nula para raios superiores a 436 metros. A equação para o cálculo da desaceleração é a seguinte:

$$d_{85} = 0,6794 - \frac{295,14}{R}; \quad 175 \text{ m} < R < 436 \text{ m} \quad (\text{D.14})$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), e R é o raio da curva circular (m). Este modelo apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,478.

O modelo de aceleração é representado por uma função degrau e não por um modelo de regressão, devido a um coeficiente de determinação muito reduzido que resultava dessa análise. Os valores médios a considerar para a aceleração, de acordo com Fitzpatrick *et al.* (2000b), estão indicados no Quadro D.4 em função do raio.

Quadro D.4 – Valores da aceleração para diferentes raios (adaptado de Fitzpatrick *et al.*, 2000b)

Raio (m)	Aceleração (m/s^2)
$175 < R < 250$	0,54
$250 < R < 436$	0,43
$436 < R < 875$	0,21
$R > 875$	0,0

b) Modelo desenvolvido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010)

Outro modelo, este apenas para o cálculo da desaceleração, desenvolvido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010), utiliza também o raio das curvas circulares como variável explicativa. Foi desenvolvido como complemento do modelo que estes autores desenvolveram relativo à estimação da velocidade operacional referido anteriormente no Capítulo 3, e apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,70. A equação para o cálculo da desaceleração é a seguinte:

$$d_{85} = 0,26357 - \frac{67,7999}{R} \quad (\text{D.15})$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), e R é o raio da curva circular (m).

c) Modelo desenvolvido por Marchionna e Perco

Existem ainda outros modelos com base em dados recolhidos em diferentes locais ao longo da curva e da reta de aproximação. Marchionna e Perco (2008) desenvolveram um modelo de desaceleração que depende do raio e é baseado em dados recolhidos com recurso a uma pistola

LIDAR ao longo das retas de aproximação às curvas em 19 estradas rurais de duas vias, em terreno plano e montanhoso, em Itália. A equação desenvolvida é a seguinte:

$$d_{85} = 1,757 - 0,222 \cdot \ln(R) \quad (\text{D.16})$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), e R é o raio da curva circular (m).

d) Modelo desenvolvido por Pérez-Zuriaga *et al.* (2013)

Num estudo mais recente, Pérez-Zuriaga *et al.* (2013) desenvolveram outro modelo de desaceleração baseado na recolha de dados na transição reta-curva em estradas rurais de duas vias. Os dados foram recolhidos de forma contínua com recurso a equipamentos de GPS, de acordo com a mesma metodologia de estudos anteriores (Pérez-Zuriaga *et al.*, 2010), em dez segmentos de estrada desprovidos de interseções principais e com raios que variam entre 52 m e 519 m. Duas equações foram desenvolvidas, uma em função do raio e outra em função do parâmetro da clotóide. Apenas a primeira é indicada de seguida:

$$d_{85} = 0,447 - \frac{90,472}{R} \quad (\text{D.17})$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), e R é o raio da curva circular (m). Este modelo, que considera o raio como variável explicativa, apresenta um R^2 igual a 0,68.

Apêndice E – Modelação do traçado através da ferramenta “AutoCAD Civil 3D”

Como indicado na secção 4.4.2, os dados retirados do equipamento permitiram modelar o segmento de estrada e encontrar com relativa exatidão as várias características geométricas do alinhamento horizontal. Com as coordenadas retiradas do equipamento e com recurso à ferramenta “AutoCAD Civil 3D”, o alinhamento foi modelado e as características geométricas do alinhamento foram obtidas. Uma vez que o equipamento recorre ao posicionamento de GPS é normal ocorrerem alguns erros de posição; no entanto, como as observações foram retiradas em intervalos de 0,1 segundos, esses erros não influenciaram a modelação do traçado. Nas figuras seguintes é apresentado um pormenor dessa mesma modelação.

A Figura E.1 mostra as coordenadas retiradas do equipamento e o resultado do ajustamento efetuado através da ferramenta “AutoCAD Civil 3D”. Este procedimento foi efetuado para o restante traçado e o alinhamento final é o indicado na Figura 4.5 da referida secção.

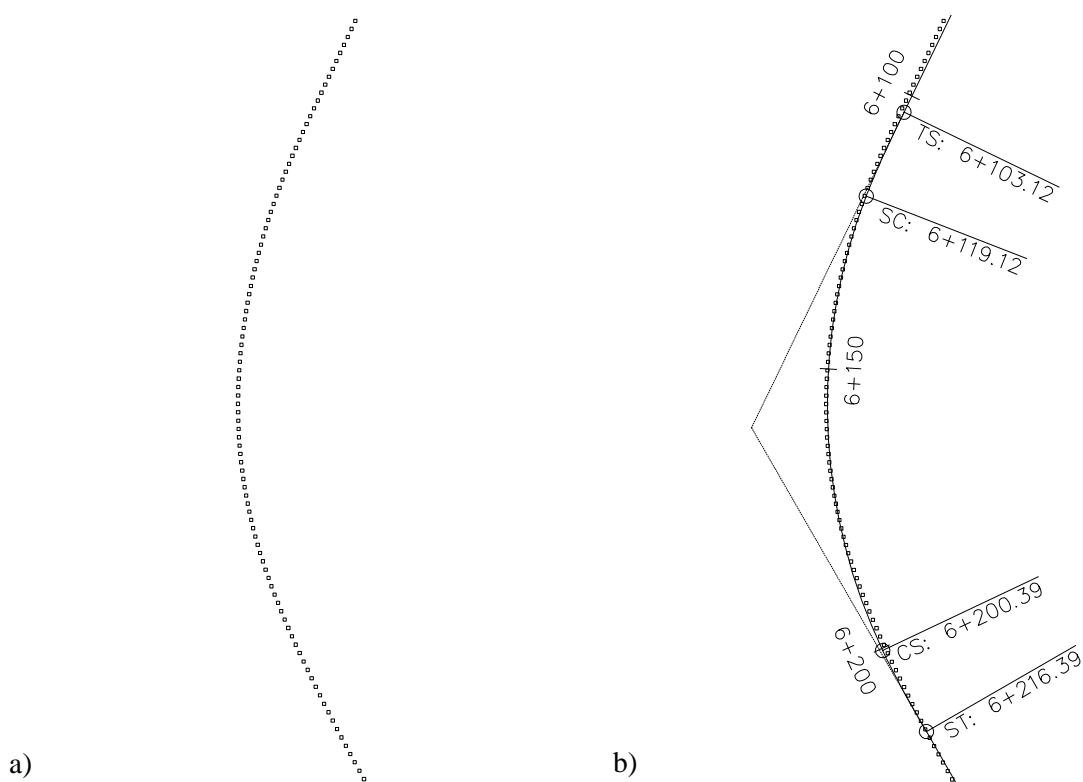


Figura E.1 – Exemplo da modelação do traçado através do AutoCAD Civil 3D numa qualquer curva da EN 231:

a) coordenadas retiradas do equipamento; b) alinhamento final após ajustamento às coordenadas

Apêndice F – Diagramas de curvatura do segmento da EN 231 (trechos 1 e 2)

Como referido na secção 4.4.2, após a modelação do traçado em planta com recurso à ferramenta “AutoCAD Civil 3D” e a partir das características geométricas do traçado resultantes da referida modelação, são construídos os diagramas de curvatura. Apresentam-se os diagramas que incluem as curvas de transição, e os que não incluem estas curvas resultado da divisão da estrada em elementos retos e curvos. Nas figuras seguintes estão representados os diagramas de curvatura dos trechos 1 e 2 no sentido Viseu-Nelas.

A Figura F.1 representa o trecho 1 incluindo as curvas de transição, enquanto a Figura F.2 representa o mesmo trecho após a divisão em elementos retos e curvos. Por fim, a Figura F.3 representa o trecho 2 incluindo as curvas de transição, enquanto a Figura F.4 representa o mesmo trecho após a uniformização em elementos retos e curvos. Note-se que, apesar de estarem representados apenas os diagramas no sentido Viseu-Nelas, a análise global foi efetuada para ambos os sentidos de trânsito.

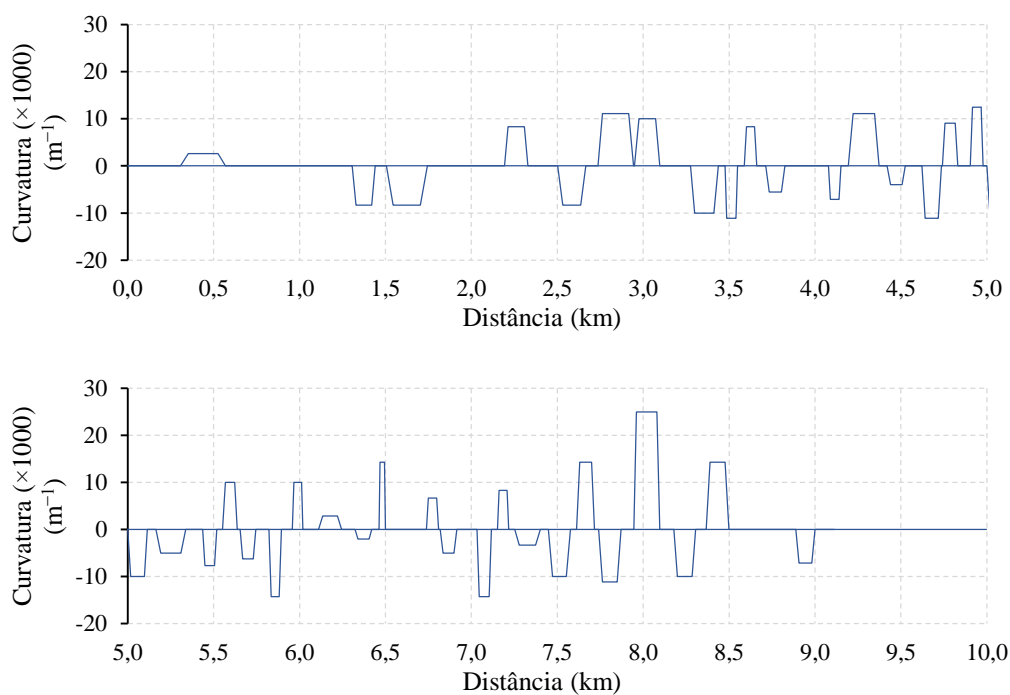


Figura F.1 – Diagrama de curvatura do trecho 1 (com clotóides), sentido Viseu-Nelas

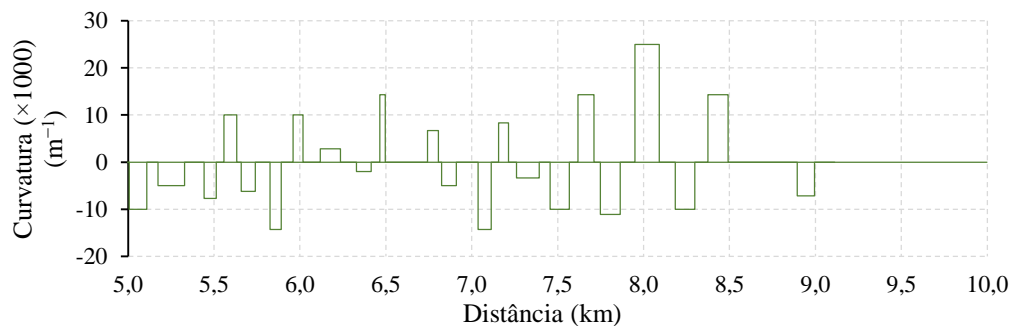
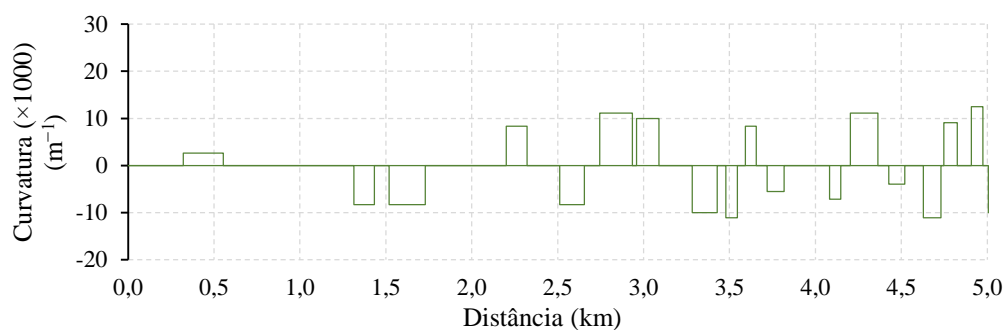


Figura F.2 – Diagrama de curvatura do trecho 1 (uniformizado), sentido Viseu-Nelas

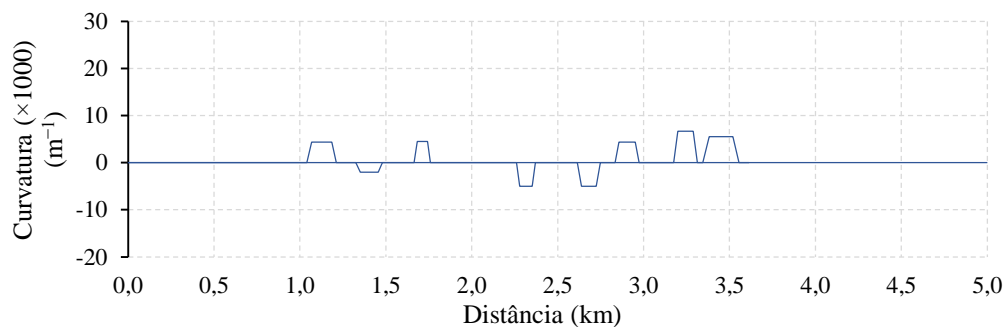


Figura F.3 – Diagrama de curvatura do trecho 2 (com clotóides), sentido Viseu-Nelas

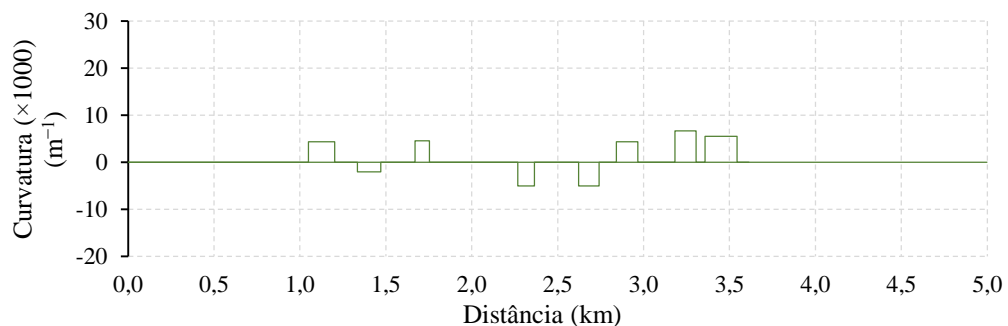


Figura F.4 – Diagrama de curvatura do trecho 2 (uniformizado), sentido Viseu-Nelas

Apêndice G – Características geométricas do segmento de estrada da EN 231 após divisão em elementos retos e curvos (trechos 1 e 2)

Na secção 4.4.2 é referido o procedimento que resulta na modelação do traçado em planta do segmento de estrada analisado. Essa modelação permitiu retirar, com relativa exatidão, as características geométricas dos vários elementos constituintes do traçado. Numa fase posterior, e de acordo com um conjunto de regras pré-definidas, procedeu-se à divisão da estrada em elementos retos e curvos. As características geométricas desses elementos, para um sentido de trânsito, são indicados nos quadros seguintes. As características geométricas do trecho 1, devido à sua extensão, encontram-se indicadas em dois quadros. No Quadro G.1 e Quadro G.2 são indicadas as características geométricas do trecho 1 após a sua divisão em elementos retos e curvos.

Quadro G.1 – Características geométricas do trecho 1 (uniformizado) sentido Viseu-Nelas, secção [0; 5] km

Ponto	DO (m)	Elemento	L (m)	Raio (m)	Curva	1/R ($\times 10^3 \text{ m}^{-1}$)
BP	0,00	Início	0,00			
TC	322,00	Reta	322,00			
CT	554,33	Curva	232,33	380,00	D	2,63
TC	1314,00	Reta	759,67			
CT	1433,00	Curva	119,00	120,00	E	-8,33
TC	1518,33	Reta	85,33			
CT	1730,33	Curva	212,00	120,00	E	-8,33
TC	2200,00	Reta	469,67			
CT	2322,33	Curva	122,33	120,00	D	8,33
TC	2512,00	Reta	189,67			
CT	2656,00	Curva	144,00	120,00	E	-8,33
TC	2745,00	Reta	89,00			
CT	2934,67	Curva	189,67	90,00	D	11,11
TC	2958,33	Reta	23,67			
CT	3088,67	Curva	130,33	100,00	D	10,00
TC	3283,33	Reta	194,67			
CT	3428,67	Curva	145,33	100,00	E	-10,00
TC	3479,33	Reta	50,67			
CT	3545,67	Curva	66,33	90,00	E	-11,11
TC	3592,33	Reta	46,67			
CT	3656,67	Curva	64,33	120,00	D	8,33
TC	3719,67	Reta	63,00			
CT	3817,33	Curva	97,67	180,00	E	-5,56
TC	4082,67	Reta	265,33			
CT	4147,33	Curva	64,67	140,00	E	-7,14
TC	4203,00	Reta	55,67			
CT	4364,00	Curva	161,00	90,00	D	11,11
TC	4426,33	Reta	62,33			
CT	4519,67	Curva	93,33	250,00	E	-4,00
TC	4628,67	Reta	109,00			
CT	4730,00	Curva	101,33	90,00	E	-11,11
TC	4747,00	Reta	17,00			
CT	4825,00	Curva	78,00	110,00	D	9,09
TC	4908,00	Reta	83,00			
CT	4974,33	Curva	66,33	80,00	D	12,50
TC	5006,33	Reta	32,00			

Quadro G.2 – Características geométricas do trecho 1 (uniformizado) sentido Viseu-Nelas, secção [5; 9,1] km

Ponto	DO (m)	Elemento	<i>L</i> (m)	Raio (m)	Curva	1/ <i>R</i> ($\times 10^3 \text{ m}^{-1}$)
CT	5108,67	Curva	102,33	100,00	E	-10,00
TC	5173,33	Reta	64,67			
CT	5327,67	Curva	154,33	200,00	E	-5,00
TC	5441,33	Reta	113,67			
CT	5513,67	Curva	72,33	130,00	E	-7,69
TC	5557,33	Reta	43,67			
CT	5632,67	Curva	75,33	100,00	D	10,00
TC	5659,00	Reta	26,33			
CT	5740,00	Curva	81,00	160,00	E	-6,25
TC	5825,33	Reta	85,33			
CT	5890,67	Curva	65,33	70,00	E	-14,29
TC	5961,00	Reta	70,33			
CT	6017,00	Curva	56,00	100,00	D	10,00
TC	6118,67	Reta	101,67			
CT	6236,33	Curva	117,67	350,00	D	2,86
TC	6328,67	Reta	92,33			
CT	6414,67	Curva	86,00	500,00	E	-2,00
TC	6464,67	Reta	50,00			
CT	6497,33	Curva	32,67	70,00	D	14,29
TC	6742,67	Reta	245,33			
CT	6805,33	Curva	62,67	150,00	D	6,67
TC	6824,00	Reta	18,67			
CT	6910,00	Curva	86,00	200,00	E	-5,00
TC	7036,33	Reta	126,33			
CT	7112,67	Curva	76,33	70,00	E	-14,29
TC	7155,33	Reta	42,67			
CT	7213,67	Curva	58,33	120,00	D	8,33
TC	7261,00	Reta	47,33			
CT	7392,00	Curva	131,00	300,00	E	-3,33
TC	7456,33	Reta	64,33			
CT	7568,67	Curva	112,33	100,00	E	-10,00
TC	7618,00	Reta	49,33			
CT	7711,00	Curva	93,00	70,00	D	14,29
TC	7747,67	Reta	36,67			
CT	7863,33	Curva	115,67	90,00	E	-11,11
TC	7950,33	Reta	87,00			
CT	8090,67	Curva	140,33	40,00	D	25,00
TC	8185,00	Reta	94,33			
CT	8298,33	Curva	113,33	100,00	E	-10,00
TC	8373,67	Reta	75,33			
CT	8491,33	Curva	117,67	70,00	D	14,29
TC	8894,00	Reta	402,67			
CT	8994,00	Curva	100,00	140,00	E	-7,14
EP	9112,00	Reta	118,00			

Por fim, no Quadro G.3 são indicadas as características geométricas referentes ao trecho 2 após a sua divisão em elementos retos e curvos. É também indicada a simbologia usada nos quadros.

Quadro G.3 – Características geométricas do trecho 2 (uniformizado) sentido Viseu-Nelas, secção [0; 3,6] km

Ponto	DO (m)	Elemento	L (m)	Raio (m)	Curva	$1/R$ ($\times 10^3 \text{ m}^{-1}$)
BP	0,00	Início	0,00			
TC	1050,00	Reta	1050,00			
CT	1203,00	Curva	153,00	230,00	D	4,35
TC	1334,33	Reta	131,33			
CT	1471,00	Curva	136,67	500,00	E	-2,00
TC	1670,67	Reta	199,67			
CT	1753,67	Curva	83,00	220,00	D	4,55
TC	2267,00	Reta	513,33			
CT	2364,00	Curva	97,00	200,00	E	-5,00
TC	2622,00	Reta	258,00			
CT	2740,67	Curva	118,67	200,00	E	-5,00
TC	2842,00	Reta	101,33			
CT	2965,67	Curva	123,67	230,00	D	4,35
TC	3183,00	Reta	217,33			
CT	3305,00	Curva	122,00	150,00	D	6,67
TC	3357,00	Reta	52,00			
CT	3544,00	Curva	187,00	180,00	D	5,56
EP	3612,00	Reta	68,00			

Simbologia

BP	início do trecho (<i>begining point</i>)
TC	ponto de transição reta-curva (<i>tangent-curve</i>)
CT	ponto de transição curva-reta (<i>curve-tangent</i>)
EP	fim do trecho (<i>end point</i>)
DO	distância à origem (m)
D	curva à direita (curvatura positiva)
E	curva à esquerda (curvatura negativa)
L	extensão do elemento (m)
$1/R$	curvatura (inverso do raio) (m^{-1})

Apêndice H – Análise de regressão linear (velocidade, desaceleração e aceleração)

H.1 Modelo de regressão linear aplicado aos dados da velocidade

Como é referido na secção 5.3.2, foram analisados quatro exemplos de modelos de regressão linear para determinar o que mais se ajustava aos dados obtidos. Os modelos de regressão incluem apenas o raio como variável independente, e foram aplicadas as seguintes transformações: o inverso do raio, ou curvatura ($1/R$), a raiz quadrada do raio ($R^{1/2}$) e o inverso da raiz quadrada do raio ($R^{-1/2}$), e tentou-se obter uma relação linear com estes parâmetros e os dados observados. Entre as várias formas do raio, a que apresentou uma maior correlação com a velocidade foi o inverso da raiz quadrada do raio ($R^{-1/2}$). A regressão linear aplicada às várias transformações do raio é indicada na figura seguinte.

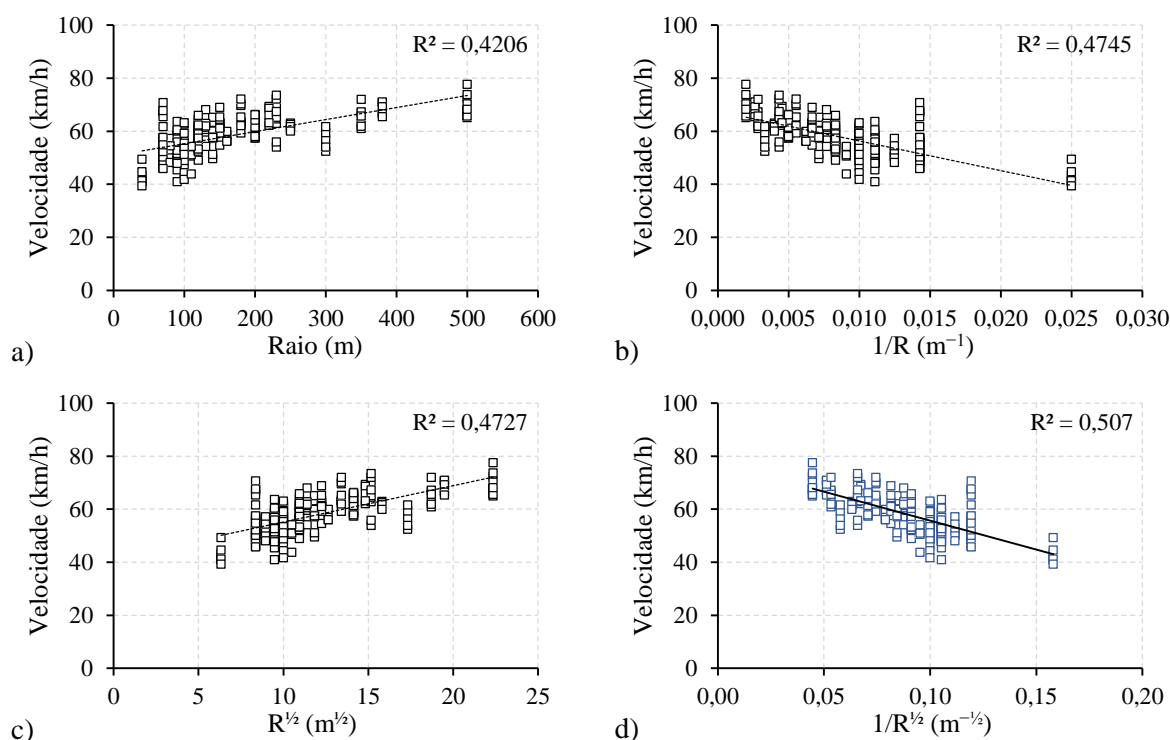


Figura H.1 – Regressão linear aplicada aos valores da velocidade em função do raio: a) velocidade vs. raio; b) velocidade vs. curvatura; c) velocidade vs. raiz quadrada do raio; d) velocidade vs. inverso da raiz quadrada do raio

O modelo linear que mais se ajusta aos dados, indicado no diagrama *d)* da figura anterior, é representado pela equação (H.1) com o raio como variável explicativa e com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,507. Este modelo é válido para um intervalo de raios entre 40 m e 500 m, e é representado pela seguinte equação:

$$V_{85C} = 77,546 - \frac{218,62}{\sqrt{R}} \tag{H.1}$$

onde V_{85C} é a velocidade operacional em curva (km/h), e R é o raio (m). No entanto, uma análise não-linear resultou num modelo exponencial com um melhor ajustamento aos dados observados. Este modelo é o indicado na secção 5.3.3.

H.2 Modelo de regressão linear aplicado aos dados da desaceleração

Na secção 5.4.2 é indicado, à semelhança do modelo de velocidades, que também foi efetuada uma análise de vários modelos de regressão linear aos valores da desaceleração utilizando o raio como variável explicativa. A variável raiz quadrada do raio ($R^{1/2}$) foi a que revelou uma maior correlação com os dados da desaceleração observados. A regressão linear aplicada às várias transformações do raio é indicada na figura seguinte.

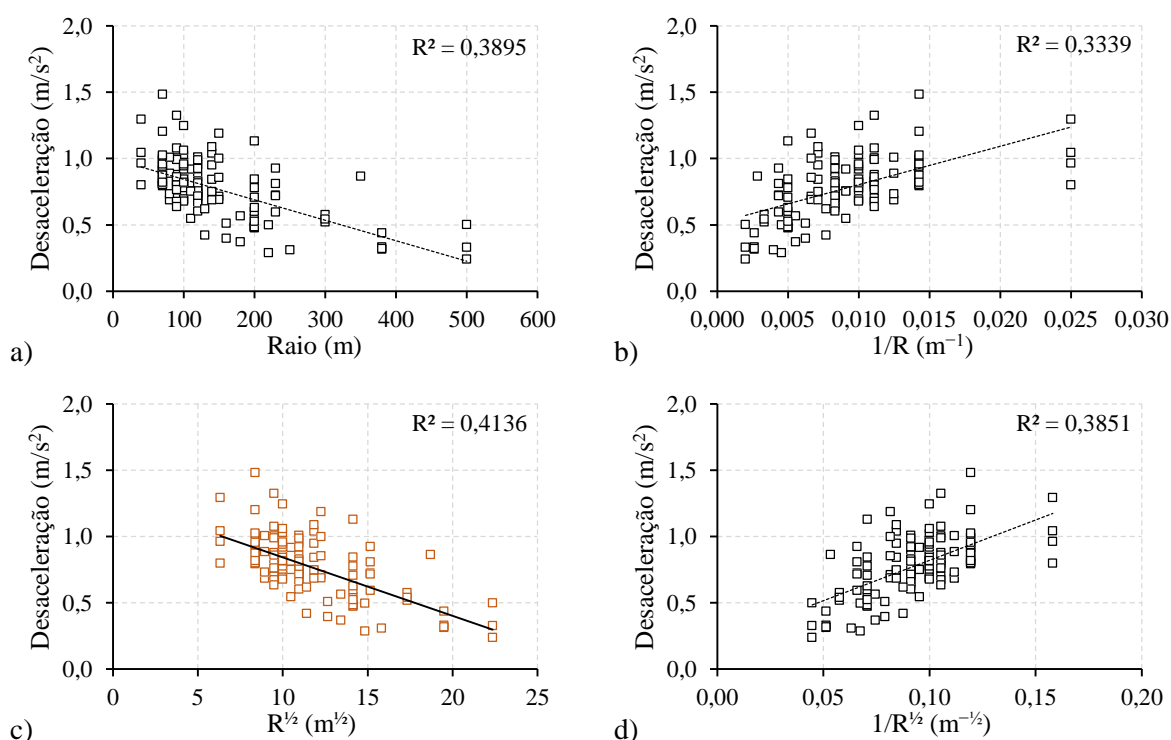


Figura H.2 – Regressão linear aplicada aos valores da desaceleração em função do raio: a) desaceleração vs. raio; b) desaceleração vs. curvatura; c) desaceleração vs. raiz quadrada do raio; d) desaceleração vs. inverso da raiz quadrada do raio

A equação que representa o modelo linear representado no diagrama c) da figura anterior, com variável independente raiz quadrada do raio e um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,4136, é a seguinte:

$$d_{85} = 1,2857 - 0,0442\sqrt{R} \quad (\text{H.2})$$

onde d_{85} é a desaceleração (m/s^2), e R é o raio (m). No entanto, após uma análise não-linear, o modelo exponencial apresenta um melhor ajustamento aos dados (ver secção 5.4.2).

H.3 Modelo de regressão linear aplicado aos dados da aceleração

Como é referido na secção 5.4.3, o modelo linear de aceleração foi desenvolvido de forma análoga ao anterior. A variável que mostrou uma melhor correlação com os valores da aceleração foi o inverso da raiz quadrada do raio ($R^{-1/2}$). A regressão linear aplicada às várias transformações do raio é indicada na figura seguinte.

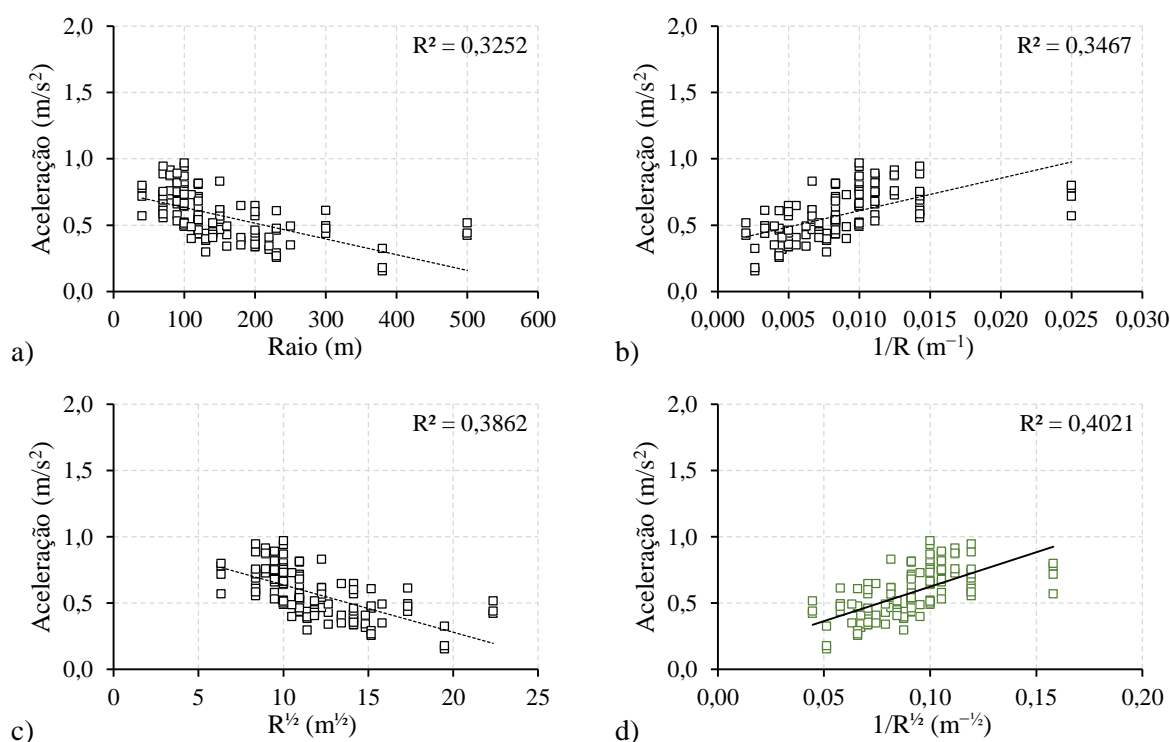


Figura H.3 – Regressão linear aplicada aos valores da aceleração em função do raio: a) aceleração vs. raio; b) aceleração vs. curvatura; c) aceleração vs. raiz quadrada do raio; d) aceleração vs. inverso da raiz quadrada do raio

A equação que representa o modelo linear representado no diagrama d) da figura anterior, com variável independente inverso da raiz quadrada do raio, é a seguinte:

$$a_{85} = 0,1054 + \frac{5,188}{\sqrt{R}} \quad (\text{H.3})$$

onde a_{85} é a aceleração (m/s²), e R é o raio (m). Este modelo apresenta um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,4021. Contudo, uma análise não-linear apresentou um melhor ajustamento aos dados (ver secção 5.4.3).

Apêndice I – Análise comparativa das equações de estimação da velocidade operacional que utilizam o raio como variável explicativa com a equação proposta

Na secção 5.3.3 é proposto um modelo de estimação da velocidade operacional em curvas, com o inverso da raiz quadrada do raio como variável independente, da mesma forma que o modelo simplificado desenvolvido no método do InIR (2010) indicado na secção 3.3.6.1, assim como o modelo desenvolvido por Kanellaidis *et al.* (1990). Fazendo uma análise comparativa do modelo desenvolvido com outros modelos que utilizam apenas o raio como variável explicativa, nota-se que este modelo tem tendência a subestimar a velocidade operacional em curvas, como se pode observar nas figuras seguintes.

Na Figura I.1 está representada a relação entre as equações do método simplificado do InIR (2010) e a equação proposta para a estimação da velocidade operacional em curvas. Dado que a EN 231 apresenta uma largura de faixa de rodagem de aproximadamente 7,0 metros, a relação direta é feita com a equação (3.6) que é utilizada para estradas com faixa de rodagem entre 6,0 m e 7,5 m.

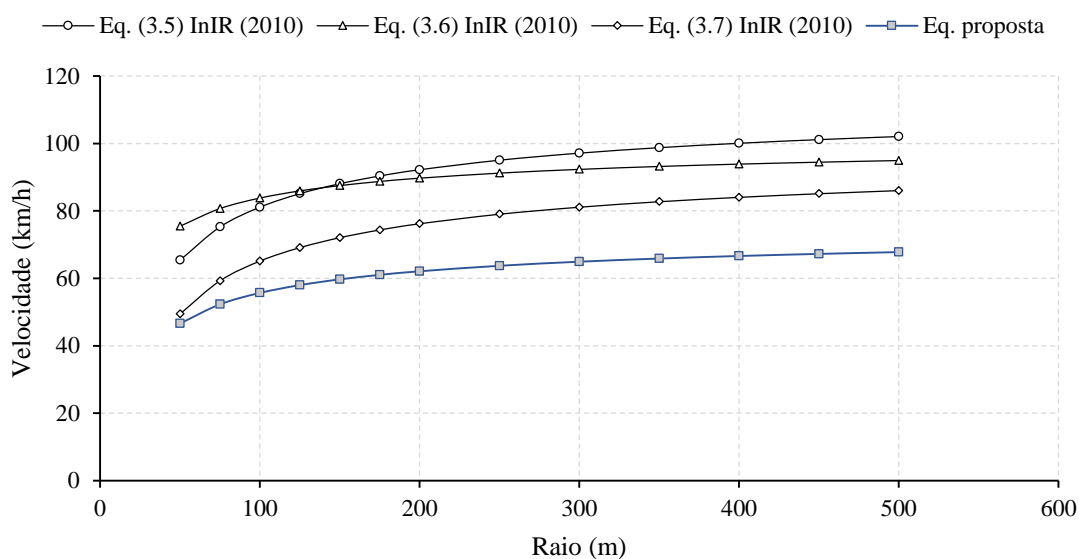


Figura I.1 – Relação entre as equações do método simplificado do InIR (2010) e a equação proposta para a estimação da velocidade operacional em curvas

Na Figura I.2 encontra-se representada a relação entre outras equações que usam apenas o raio como variável explicativa. Estas equações encontram-se descritas no Apêndice D.

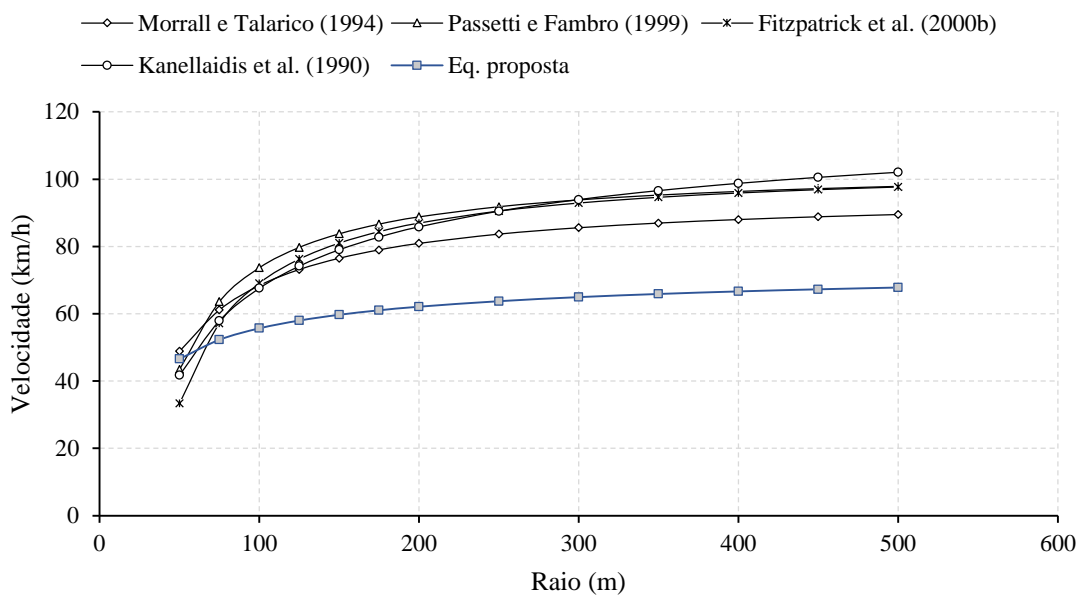


Figura I.2 – Relação entre algumas das equações presentes no Apêndice D e a equação proposta para a estimativa da velocidade operacional em curvas

Apêndice J – Análise comparativa das equações de estimação da desaceleração que utilizam o raio como variável explicativa com a equação proposta

Na secção 5.4.2 é proposto um modelo de estimação da desaceleração na aproximação às curvas. Na maioria dos modelos de desaceleração indicados no Capítulo 3 e no Apêndice D, a curvatura ($1/R$) é a variável que, de acordo com os autores, mais se correlacionava com os dados, com a exceção do modelo de Marchionna e Perco (2008) que utiliza um modelo logarítmico função do raio para a estimação da desaceleração e, no entanto, é o que mais se aproxima ao modelo proposto neste estudo, como se pode verificar pela figura seguinte.

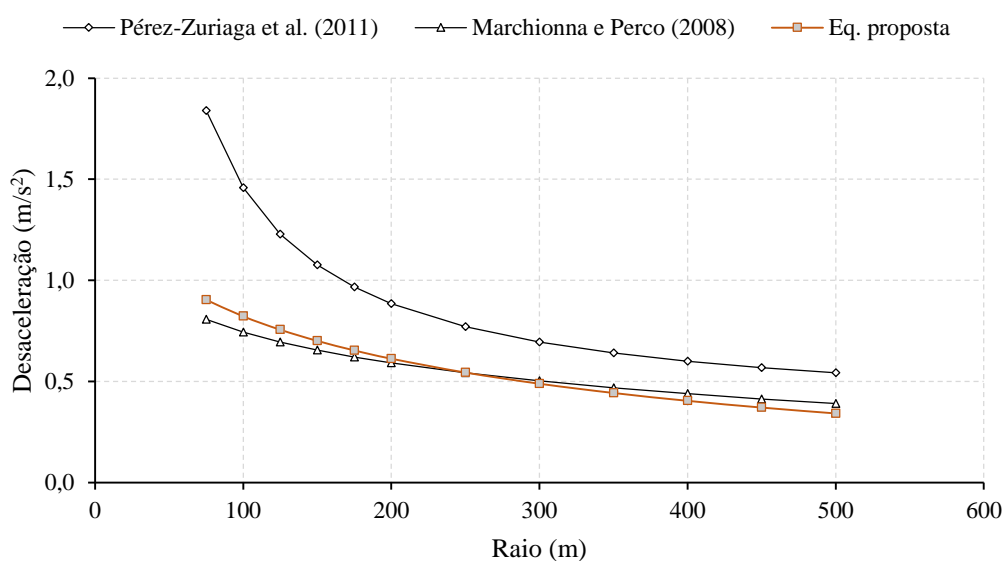


Figura J.1 – Relação entre os modelos de Pérez-Zuriaga *et al.* (2011) e Marchionna e Perco (2008) e a equação proposta para a estimação da desaceleração na aproximação às curvas

Na Figura J.2 está representada a relação entre outras equações indicadas no Apêndice D para a estimação da desaceleração e a equação proposta na secção 5.4.2. Os valores máximos da desaceleração para o mesmo raio, entre os vários modelos, encontram-se muito próximos; contudo, o mesmo não se verifica para os valores mínimos que atingem uma desaceleração nula para raios muito inferiores aos verificados no modelo proposto, nomeadamente os modelos desenvolvidos por Pérez-Zuriaga *et al.* (2010) e Pérez-Zuriaga *et al.* (2013).

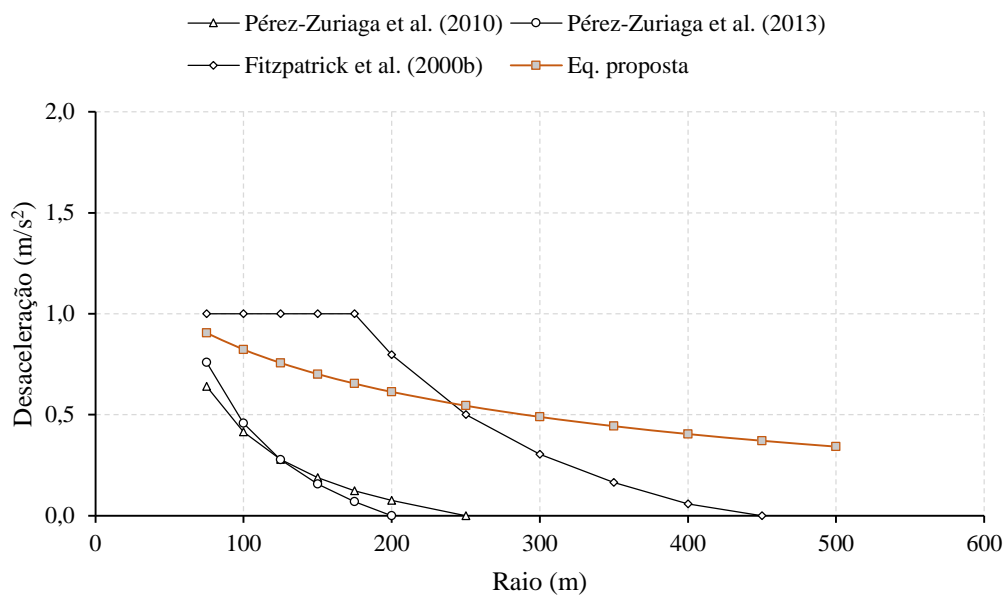


Figura J.2 – Relação entre algumas das equações presentes no Apêndice D e a equação proposta para a estimativa da desaceleração na aproximação às curvas

Apêndice K – Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps

Na secção 5.5.3 é proposto o modelo de previsão de perfis de velocidades com base no modelo de *car-following* Gipps. Alguns parâmetros foram alterados e outros adaptados, entre os quais o tempo de reação, a distância entre veículos, e um novo parâmetros que avalia a distância a que o condutor se encontra do fim do elemento. Nesta secção é abordado um exemplo que corresponde a uma aproximação a uma curva. Inicialmente é assumido que o tempo de reação é igual ao intervalo de simulação, denotado neste exemplo por dt . Mostra-se de seguida a influência do tempo de reação e do S (intervalo espacial mínimo entre veículos). Então, considerando que o L , que corresponde ao “comprimento” dos veículos, é nulo, que a V_{des} em reta é igual a 19,44 m/s (70 km/h), que a V_{des} em curva é igual a 10 m/s (36 km/h), e que o parâmetro d , que corresponde à desaceleração do líder e do seguidor, é igual a 0,6 m/s², admite-se o seguinte: no início da curva está um veículo “estacionário” com uma velocidade de 10 m/s; o seguidor deve chegar a este ponto com uma velocidade tal que lhe permita parar em resposta a uma desaceleração do líder, ficando no fim da manobra a uma distância S do líder. Neste exemplo, a velocidade do líder é denotada por V_L e a velocidade do seguidor é denotada por V_F .

Caso 1 – Admitindo $dt \approx 0$ (0,01 s) e $S = 0$

A distância percorrida pelo líder durante a travagem (D_L) e a distância percorrida pelo seguidor (D_F) são dadas pelas seguintes expressões:

$$D_L = \frac{V_L^2}{2d} \quad (\text{K.1})$$

$$D_F = 1,5dt \cdot V_F + \frac{V_F^2}{2d} \quad (\text{K.2})$$

onde D_L e D_F correspondem à distância percorrida pelo líder durante a travagem e à distância percorrida pelo seguidor, respetivamente, V_L e V_F correspondem à velocidade do líder e seguidor, respetivamente, d é a desaceleração do líder e do seguidor, e dt é o tempo de reação. Ambas as equações são apresentadas em unidades SI. O fator de 1,5 é uma margem de segurança que faz parte do modelo de Gipps, isto é, o “tempo de reação real” é $1,5dt$.

Aplicando uma velocidade de 10 m/s e uma desaceleração de 0,6 m/s² à equação (K.1) vem que a distância percorrida pelo líder durante a travagem é 83,3 m. Como $dt \approx 0$, a distância percorrida pelo seguidor é semelhante. Neste caso, a resposta do seguidor à travagem do líder é instantânea e não é necessário reservar uma distância S , logo o seguidor chega à curva exatamente à velocidade do líder (V_{des} em curva), como se pode verificar pela Figura K.1.

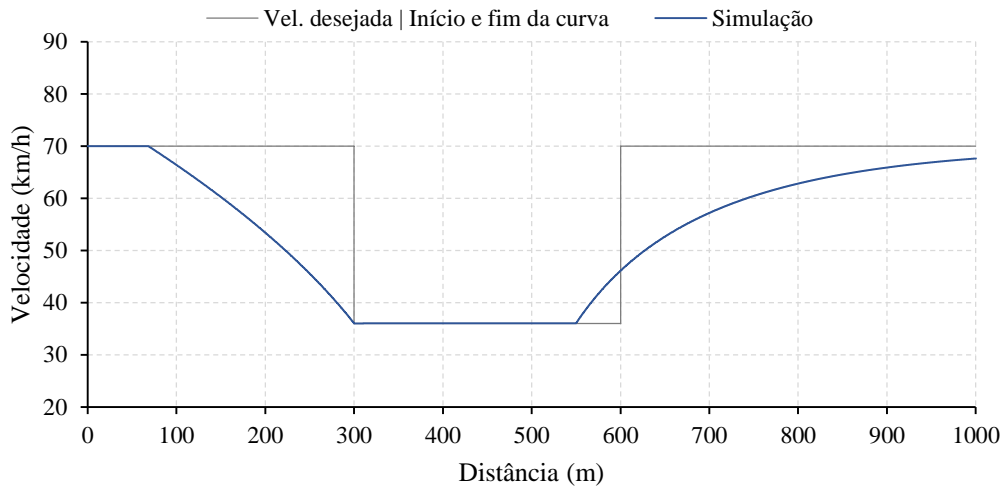


Figura K.1 – Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps, caso 1

Caso 2 – Admitindo $dt = 0,7$ s e $S = 10$ m

Para estes valores, neste caso, o resultado da simulação é o que se observa na figura seguinte.

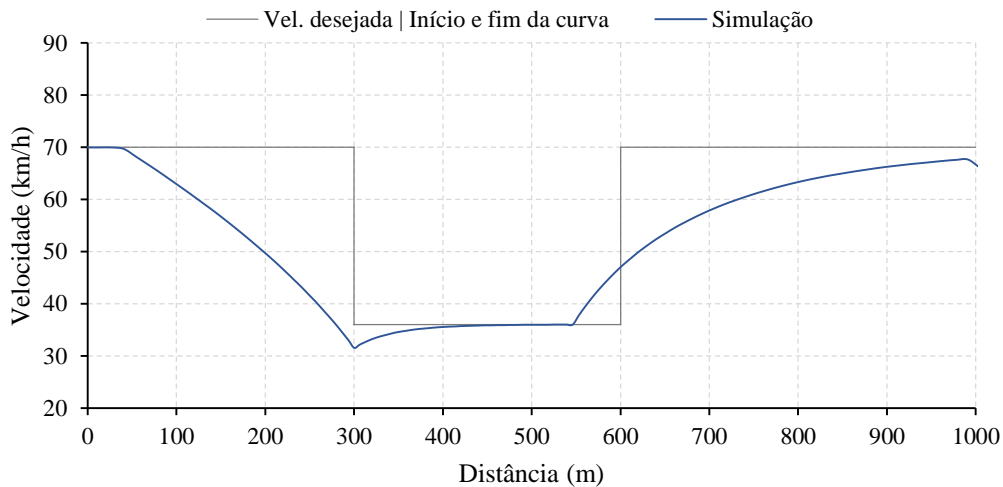


Figura K.2 – Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps, caso 2

Neste caso, o seguidor chega à curva com uma velocidade de 8,77 m/s (31,6 km/h). A distância percorrida pelo líder é de 83,3 m, como calculado no caso anterior. A distância percorrida pelo seguidor é dada pela equação (K.2) com a velocidade igual a 8,77 m/s, o dt igual a 0,7 s e a desaceleração igual a 0,6 m/s², como indicado previamente. Resulta que a D_F é igual a 73,3 m, ficando assim, $D_L - D_F = 83,3 - 73,3 = 10$ m, ou seja, à distância S pretendida.

Caso 3 – Admitindo $dt = 0,01$ s e $S = -20$ m

Alterando o valor de dt para próximo de zero indica que a reação do seguidor é praticamente instantânea. O parâmetro S , neste caso, toma um valor negativo para que o veículo faça parte da desaceleração na curva. O resultado é o indicado na figura seguinte:

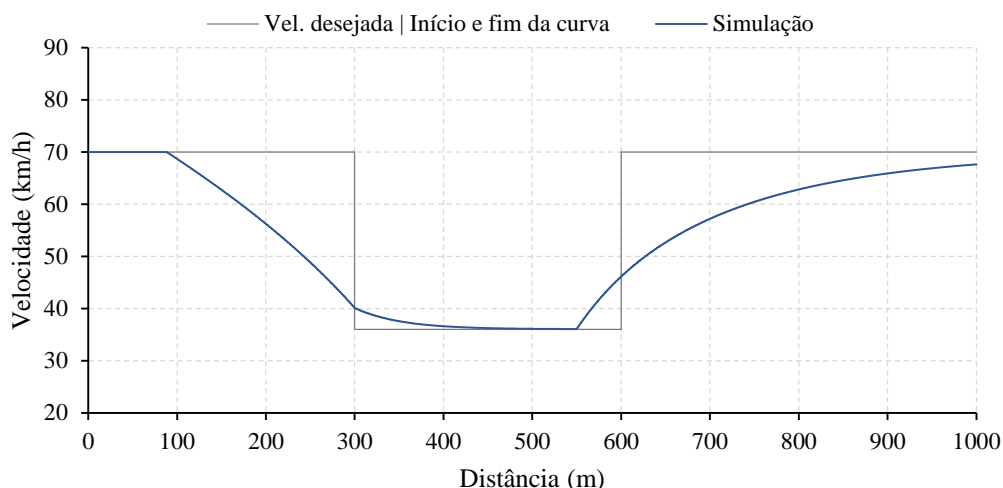


Figura K.3 – Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps, caso 3

Neste caso, o seguidor chega à curva com uma velocidade de 11,1 m/s (40 km/h). Então, a velocidade percorrida pelo líder durante a travagem continua a ser 83,3 m. Já a distância percorrida pelo seguidor, substituindo os valores da velocidade, aceleração e tempo de reação com os que se referem a este caso em particular, temos que D_F é igual a 102,8 m, ficando assim $D_F - D_L = 102,8 - 83,3 = 19,5$ m, ou seja, à distância S pretendida (ultrapassa o líder, sem significado físico).

Após o ponto de início da curva, sucede-se que o novo líder está no fim da curva com uma velocidade de 70 km/h, e a velocidade desejada em curva pelo veículo é inferior à velocidade atual (de entrada na curva). Assim, aplica-se a primeira equação do modelo de Gipps (convergência assintótica para nova velocidade sem influência do líder).

Saída da curva para a reta

Outra adição ao modelo de Gipps foi a necessidade de antecipar a aceleração na saída da curva. Tal como está implementado, a velocidade na reta converge para a V_{des} (em reta), como se verifica na figura seguinte.

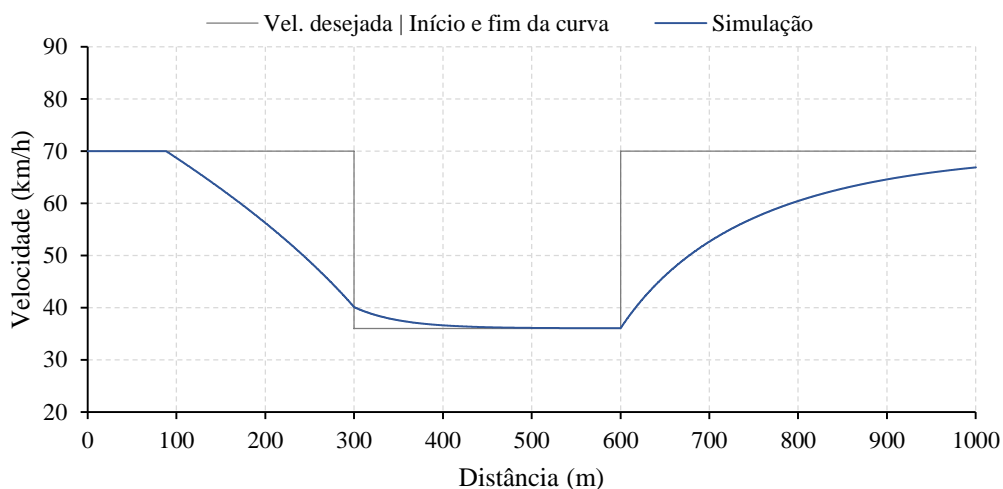


Figura K.4 – Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps (distância para o fim nula)

Assim, foi necessário criar a possibilidade de quando faltar uma determinada distância para o fim da curva, o condutor passar a considerar como velocidade desejada o máximo da velocidade em curva e da velocidade do elemento seguinte, o que na prática permite antecipar a aceleração, como se pode observar na figura seguinte.

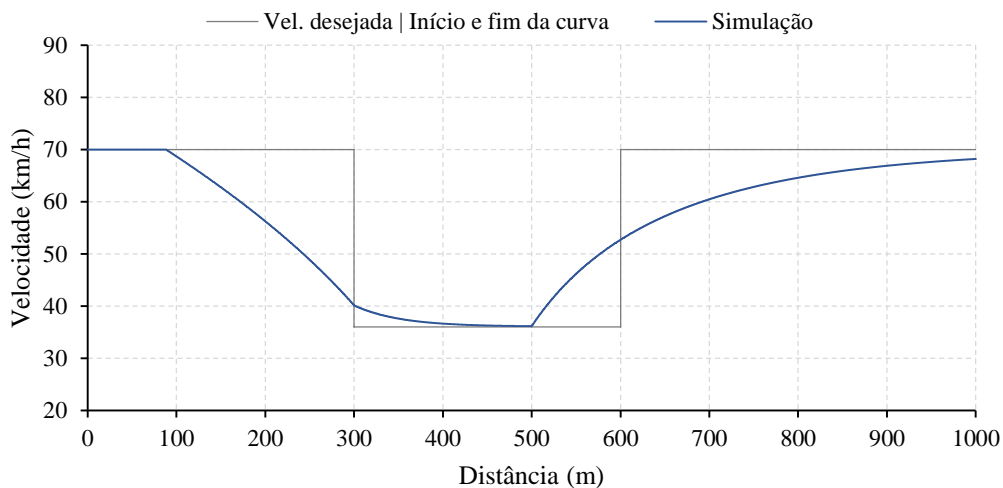


Figura K.5 – Exemplo de aplicação do modelo adaptado de Gipps (distância para o fim igual a 100 m)

Neste caso, a título de exemplo, foi considerada uma distância para o fim da curva de 100 m. Contudo, este parâmetro, assim como o parâmetro S analisado nos exemplos anteriores, fazem parte de um conjunto de parâmetros avaliados pelo processo de otimização assente no algoritmo genético, com o objetivo de modelar o comportamento de um determinado condutor na aproximação e saída de uma curva.

Apêndice L – Resultados do cálculo dos parâmetros necessários à construção dos diagramas de velocidades

Na secção 6.2 são apresentados vários diagramas de velocidades, decorrentes da análise comparativa de avaliação da homogeneidade de um traçado. Os resultados do cálculo dos parâmetros necessários à sua construção encontram-se presentes nos quadros seguintes.

Quadro L.1 – Resultado do cálculo dos parâmetros para o traçado não uniformizado

Elemento	Início	Fim	L (m)	R A (m)	Método JAE		Método Lobo <i>et al.</i>	
					V (km/h)	DT (m)	V (km/h)	DT (m)
Reta	0,0	330,0	330,0		100,0		88,0	
Clotóide	330,0	375,9	45,9	105	100,0	186,7	88,0	40,3
Curva	375,9	500,9	125,0	240	78,3		83,2	
Clotóide	500,9	546,9	45,9	105	100,0	186,7	91,5	70,0
Reta	546,9	1046,9	500,0		100,0		91,5	
Clotóide	1046,9	1176,6	129,7	210	100,0	86,1	91,5	41,1
Curva	1176,6	1515,6	339,0	-340	90,6		86,7	
Clotóide	1515,6	1645,3	129,7	210	100,0	86,1	91,6	42,0
Reta	1645,3	2125,3	480,0		100,0		91,6	
Clotóide	2125,3	2202,8	77,5	155	100,0	115,7	91,6	93,3
Curva	2202,8	2352,8	150,0	310	87,2		80,3	
Clotóide	2352,8	2430,3	77,5	155	100,0	115,7	91,8	95,5
Reta	2430,3	2950,3	520,0		100,0		91,8	
Clotóide	2950,3	3070,3	120,0	240	100,0	0,0	91,8	15,4
Curva	3070,3	3390,3	320,0	480	100,0		90,1	
Clotóide	3390,3	3510,3	120,0	240	100,0	0,0	91,8	14,9
Reta	3510,3	3900,3	390,0		100,0		91,8	

Quadro L.2 – Resultado do cálculo dos parâmetros para o traçado uniformizado

Elemento	Início	Fim	L (m)	R (m)	Método InIR		Método HERG	
					V (km/h)	L ₁ ou L ₃ (m)	V (km/h)	L ₁ ou L ₃ (m)
Reta	0,0	345,3	345,3		90,0	46,1	110,0	231,6
Curva	345,3	531,6	186,3	240	84,5	24,0	85,4	162,9
Reta	531,6	1090,1	558,5		87,4	25,5	103,3	121,4
Curva	1090,1	1602,1	511,9	-340	84,3	45,8	90,3	151,3
Reta	1602,1	2151,1	549,1		89,8	35,4	106,3	161,2
Curva	2151,1	2404,5	253,3	310	85,6	29,3	89,2	158,5
Reta	2404,5	2990,3	585,8		89,1	18,8	106,0	146,8
Curva	2990,3	3470,3	480,0	480	86,9	54,2	90,5	152,1
Reta	3470,3	3900,3	430,0		93,1		106,5	