



Rita Alexandra da Cruz Braz Ferreira

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS VEÍCULOS PESADOS NO DESEMPENHO OPERACIONAL DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA, RECORRENDO A TÉCNICAS DE MICROSIMULAÇÃO

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF HEAVY VEHICLES IN THE OPERATIONAL
PERFORMANCE OF THE ROAD INFRASTRUCTURE, THROUGH MICROSIMULATION
TECHNIQUES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pela Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva.

Coimbra, 27 de Setembro de 2017



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Rita Alexandra da Cruz Braz Ferreira

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS VEÍCULOS PESADOS NO DESEMPENHO OPERACIONAL DA INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA, RECORRENDO A TÉCNICAS DE MICROSIMULAÇÃO

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF HEAVY VEHICLES IN THE OPERATIONAL PERFORMANCE OF THE ROAD INFRASTRUCTURE, THROUGH MICROSIMULATION TECHNIQUES

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Urbanismo, Transportes e Vias de Comunicação,
orientada pela Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer
responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões
que possa conter.

Coimbra, 27 de Setembro de 2017

AGRADECIMENTOS

Nesta secção deixo um agradecimento às pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização de mais uma etapa da minha formação académica.

À Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva, Professora do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (FCTUC), agradeço a sua notável orientação nesta dissertação, os seus ensinamentos, o incentivo e disponibilidade que me proporcionou. Agradeço pela forma amigável com que sempre me recebeu, nas nossas reuniões de trabalho e ao longo da minha formação.

Aos meus colegas, deixo um grande agradecimento por todo o carinho, preocupação, apoio, motivação e companheirismo que me prestaram no decorrer do curso. Agradeço a partilha de bons momentos, o convívio, as boas discussões e, principalmente, a amizade que criámos.

À minha colega de casa, pela companhia, amizade e bons momentos que partilhamos e à minha madrinha de curso pelo aconselhamento, disponibilidade e apoio prestados.

Aos excelentes amigos que me rodeiam, pela atenção, preocupação, e força que sempre prestaram, pela cumplicidade e pelos magníficos momentos que partilhamos. Agradeço do fundo do coração a vossa verdadeira amizade.

Não podia deixar de agradecer à minha família por todo o carinho e motivação que me deram, por acreditarem sempre nas minhas capacidades e pela presença em todos os momentos especiais.

Ao meu namorado, um agradecimento especial pela compreensão e paciência, pelo carinho e apoio incondicional, e pela força e transmissão de confiança, em todos os momentos. Agradeço a preocupação e incentivo prestados, e por ter caminhado ao meu lado.

Por fim, dirijo um enorme agradecimento aos meus pais, pelo apoio incondicional, incentivo, aconselhamento e paciência demonstrados ao longo desta caminhada, pela transmissão de boas maneiras e ensinamentos da vida, por acreditarem sempre em mim, e principalmente, por me ajudarem a superar mais uma meta. Por tudo, a minha enorme gratidão!

RESUMO

O tráfego rodoviário é caracterizado por um grande número de diferentes tipos de veículos, e, devido às suas características físicas e mecânicas, têm diferente influência no desempenho da infraestrutura rodoviária.

Devido às suas dimensões e relação peso/potência, os veículos pesados caracterizam-se habitualmente pela prática de velocidades inferiores às do tráfego de veículos leves, sendo esse efeito particularmente agravado em rampas ascendentes de elevada inclinação. Tal característica reflete-se habitualmente na redução da capacidade e dos níveis de serviço associados às rodovias. Importa assim compreender, quais os fatores que afetam o desempenho dos veículos pesados.

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto dos veículos pesados na qualidade de serviço de correntes de tráfego, a partir de estimativas de fatores de equivalência, usando modelos de microsimulação e tendo por base as condições de circulação.

O trecho analisado corresponde a um segmento de autoestrada, e através do simulador AIMSUN foi possível controlar as características da estrada, do tráfego, dos veículos e dos condutores. Os dados da simulação permitiram desenvolver as relações entre as variáveis escolhidas, para calcular os fatores de equivalência, comparando um tráfego apenas com veículos leves com um tráfego misto.

Neste estudo concluiu-se que o efeito dos veículos pesados diminui com o aumento da percentagem de veículos pesados, e aumenta com a variação do nível de saturação, uma vez que para volumes mais baixos há menos interação entre os veículos. Também se verificou um aumento do efeito dos veículos pesados com o aumento da inclinação e da extensão do trecho inclinado, devido à sua relação peso/potência.

Palavras-chave: Veículos Pesados, Unidade de Veículo Leve Equivalente, Microsimulação, Calibração, Autoestrada, Tráfego

ABSTRACT

Road traffic is characterized by a large number of different types of vehicles and, due of their physical and mechanical characteristics, have different influence on the performance of road infrastructure.

Due to their size and weight / power ratio, heavy vehicles are usually characterized by lower speeds than passenger car, and this effect is particularly aggravated by steep upgrades. This characteristic is usually reflected in the reduction of capacity and service levels associated with highways. It matters that, which are factors that affect the performance of heavy vehicles.

The objective of this study is the impact of heavy vehicles on the quality of service of traffic streams, from equivalence models, using microsimulation models and based on conditions of circulation.

The section analyzed corresponds to a segment of freeway, and through the AIMSUN microsimulator, it was possible to control the characteristics of road, traffic, vehicles and drivers. The simulation data were allowed as the relationships between variables, to calculate the equivalence factors, comparing a fleet of passenger cars only with a mixed fleet.

In this study, we conclude the effect of heavy vehicles: decrease with increase of percentage of heavy vehicles; increase with increase of saturation level, because for lower volumes there is less interaction between vehicles. There was also an increase in the effect of heavy vehicles with increase of level grades and grade length due to weight / power ratio.

Key words: Heavy Vehicles, Passenger Car Equivalent, Microsimulation, Calibration, Freeway, Traffic

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO	II
ABSTRACT	III
ÍNDICE	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE QUADROS.....	VIII
SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS	IX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO AO TEMA.....	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO E METODOLOGIA DE ABORDAGEM	3
1.3 ESTRUTURA DA TESE	4
2 LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE.....	5
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
2.2 ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DE EQUIVALÊNCIA	6
2.2.1 Conceito	6
2.2.2 Variáveis que influenciam o fator de conversão	7
2.2.3 Métodos empregues e principais resultados.....	9
2.2.4 Considerações Finais	22
2.3 MODELOS DE MICROSIMULAÇÃO	24
2.3.1 Enquadramento e Caracterização geral.....	24
2.3.2 A importância do processo de calibração	26
2.3.3 Exemplos de Trabalhos científicos baseados em modelos de microsimulação..	27
2.3.4 Considerações finais	31
3 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DE TRABALHO	32
3.1 METODOLOGIA GERAL E OBJETO DO TRABALHO	32
3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	32
3.2.1 Características geométricas da infraestrutura.....	33
3.2.2 Características dos veículos	34
3.3 CALIBRAÇÃO DO MODELO.....	35
3.4 VARIÁVEIS CONSIDERADAS	37

3.5	MÉTODOS UTILIZADOS	38
3.5.1	Método baseado na comparação dos fluxos	39
3.5.2	Método baseado na comparação das velocidades	40
3.6	VIA DE ACELERAÇÃO	40
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	42
4.1	DETERMINAÇÃO DO FLUXO DE SATURAÇÃO.....	42
4.2	ESTIMAÇÃO E ANÁLISE DAS CURVAS FUNDAMENTAIS DO TRÁFEGO	43
4.2.1	Efeito do nível de saturação	43
4.2.2	Efeito da percentagem de veículos pesados	45
4.2.3	Efeito da inclinação longitudinal	47
4.2.4	Efeito do comprimento da rampa	48
4.2.5	Efeito da velocidade	51
4.2.6	Efeito do número de vias	52
4.3	ESTIMAÇÃO DOS FATORES DE EQUIVALÊNCIA.....	53
4.3.1	Método baseado na comparação dos fluxos.....	54
4.3.2	Método baseado na comparação das velocidades	59
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
4.5	ANÁLISE DA EXISTÊNCIA DE VIA DE ACELERAÇÃO	65
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	67
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
7	ANEXOS	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Peso e dimensão dos veículos pesados: (a) até 45 toneladas; (b) até 74 toneladas (DNIT, 2006).....	1
Figura 2.1 – Valores UVE para a percentagem de veículos pesados (Chandra et al., 1994)...	20
Figura 2.2 – Valores UVE para a percentagem de veículos pesados (Ahmed, 2010)	21
Figura 2.3 – Caso imaginário para o fator UVE quando os comprimentos dos veículos pesados são iguais ao comprimento dos veículos ligeiros (Al-Obaedi, 2016).....	22
Figura 2.4 – Fluxo de tráfego vs densidade para: (a) uma corrente de tráfego homogénea (veículos ligeiros apenas); (b) uma corrente de tráfego mista (Cunha e Setti, 2011).....	29
Figura 2.5 – Notação usada para o intervalo espacial entre o veículo seguidor e o veículo líder (Sarvi, 2011).....	30
Figura 2.6 – Curva velocidade/densidade com dados empíricos e simulados (Giuffré et al., 2015)	30
Figura 3.1 - Representação da inclinação e do comprimento do troço inclinado considerados (adaptado de Cunha e Setti, 2011).....	33
Figura 3.2 – Dados empíricos e dados simulados.....	37
Figura 4.1 – Curvas: (a) Base; (b) Mista.....	42
Figura 4.2 – Gráfico com os resultados da comparação de um tráfego simples e de um tráfego misto, com o aumento do nível de saturação, para a variável: (a) Atraso; (b) Tempo de viagem	43
Figura 4.3 - Gráfico com os resultados da comparação de um tráfego simples e de um tráfego misto, com o aumento do nível de saturação, para a variável: (a) Fluxo; (b) Velocidade.	44
Figura 4.4 – Gráfico com os valores do headway para a variação do nível de saturação, para um tráfego misto	45
Figura 4.5 – Gráficos com resultados das variáveis estudadas para a variação da percentagem de veículos pesados.....	46
Figura 4.6 - Gráfico com os valores do headway à medida que a percentagem de veículos pesados aumenta	47
Figura 4.7 - Gráficos com resultados das variáveis estudadas para a variação da inclinação, para um tráfego misto	48
Figura 4.8 - Gráficos com resultados das variáveis estudadas para a variação da extensão, para 3% de inclinação e um tráfego misto.....	49
Figura 4.9 - Gráficos com resultados das variáveis estudadas para a variação da extensão, para 7% de inclinação e um tráfego misto.....	50

Figura 4.10 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para o aumento da velocidade, para um tráfego misto	51
Figura 4.11 - Gráfico com os valores do headway de um tráfego misto à medida que a velocidade aumenta.....	52
Figura 4.12 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para a variação do número de vias, para um tráfego misto	53
Figura 4.13 – Valores UVE estimados para diferentes percentagens de veículos pesados	54
Figura 4.14 - Valores UVE estimados para a variação do nível de saturação	55
Figura 4.15 - Valores UVE estimados para a variação da velocidade.....	55
Figura 4.16 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação.....	56
Figura 4.17 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação e extensão do trecho inclinado, para um tráfego com 5% de veículos pesados.....	57
Figura 4.18 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação, extensão do trecho inclinado e percentagem de veículos pesados	58
Figura 4.19 - Valores UVE estimados para diferentes percentagens de veículos pesados	60
Figura 4.20 - Valores UVE estimados para a variação do nível de saturação	60
Figura 4.21 - Valores UVE estimados para a variação da velocidade.....	61
Figura 4.22 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação.....	61
Figura 4.23 - Valores UVE estimados para a variação da extensão	62
Figura 4.24 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação, extensão do trecho inclinado e percentagem de veículos pesados	62
Figura 4.25 – Valores UVE estimados para a inserção de uma via de aceleração	66

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – UVE para veículos pesados (camiões e autocarros) em rampas ascendentes (TRB, 2010).....	8
Quadro 2.2 – UVE para veículos pesados (camiões e autocarros) em rampas descendentes (TRB, 2010).....	8
Quadro 2.3 – Valores propostos para o fator UVE em condições sobressaturadas (Al-Kaisy e Rakha, 2005).....	12
Quadro 2.4 – Variação do UVE com a percentagem de veículos pesados na corrente de tráfego (Ingle, 2004)	13
Quadro 2.5 – Variação do UVE com a inclinação longitudinal do trecho (Ingle, 2004).....	14
Quadro 2.6 – Variação do UVE com o comprimento do trecho inclinado (Ingle, 2004)	15
Quadro 2.7 – Veículos ligeiros equivalentes para veículos pesados em segmentos inclinados específicos no Brasil, para uma velocidade em regime livre de 110 km/h (Cunha e Setti, 2011)	16
Quadro 2.8 - Veículos ligeiros equivalentes para veículos pesados em segmentos inclinados específicos no Brasil, para uma velocidade em regime livre de 100 km/h (Cunha e Setti, 2011)	16
Quadro 2.9 – Estimativa do fator UVE para diferentes inclinações e fluxos de tráfego (Giuffrè et al., 2015).....	18
Quadro 2.10 – Comparação dos valores obtidos nos diferentes estudos apresentados, através do método baseado na comparação dos fluxos.....	23
Quadro 3.1 – Características gerais do veículo pesado simulado.....	34
Quadro 3.2 – Características de tráfego e geométricas consideradas para a análise	38
Quadro 3.3 – Extensão total das vias de aceleração (JAE P5/90)	41
Quadro 4.1 – Valores da densidade para os níveis de saturação	43
Quadro 4.2 – Gama de valores UVE estimados para a variação da inclinação, extensão do trecho inclinado e percentagem de veículos pesados.....	63
Quadro 4.3 – Comparação dos valores obtidos na literatura anteriormente apresentada e dos valores obtidos no presente estudo, para o método baseado na comparação dos fluxos	64
Quadro 4.4 - Comparação dos valores obtidos na literatura anteriormente apresentada e dos valores obtidos no presente estudo, para o método baseado na comparação das velocidades .	65

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

- A_c - área de um veículo ligeiro;
 A_i - área de um veículo pesado;
AIMSUN – Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks;
 D – densidade (veic/km);
 D_c - densidade crítica (veic/km);
 E_r - fatores de equivalência de veículos recreacionais em veículos ligeiros;
 E_t - fatores de equivalência de camiões/autocarros em veículos ligeiros;
 f_{HV} - fator de ajuste dos veículos pesados;
 H_B - *headway* médio para um fluxo de veículos ligeiros apenas (seg/veic);
 h_c - *headway* dos veículos ligeiros (seg/veic);
HCM – Highway Manual Capacity;
 h_t - *headway* dos veículos pesados (seg/veic);
km – quilómetros;
OMM – Organização Meteorológica Mundial;
 P_C - percentagem de veículos ligeiros;
 P_r – percentagem de veículos recreacionais;
 P_t - percentagem de veículos pesados;
 Q_B - fluxo de veículos ligeiros apenas (veic/h);
 Q_M - fluxo de veículos ligeiros e veículos pesados (veic/h);
UVE – Unidade de Veículo Ligeiro Equivalente;
 V – velocidade (km/h);
 V_{FF} - velocidade de fluxo livre (km/h);
 V_c - velocidade média de uma corrente mista (km/h);
 V_i - representa a velocidade média de uma corrente com veículos ligeiros apenas;
 v_l - veículo ligeiro;
 x_i - dados simulados no *software* AIMSUN;
 y_i - dados empíricos obtidos através das equações de Wu e May.

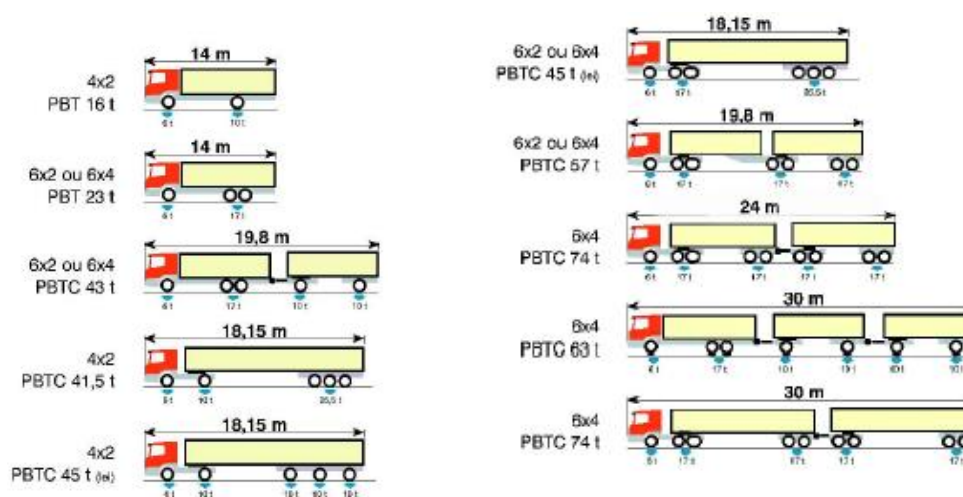
1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento ao tema

Os principais objetivos a considerar no funcionamento de uma infraestrutura rodoviária devem ser a sua aptidão para escoar correntes de tráfego e assegurar a qualidade do serviço aos seus utilizadores.

O tráfego rodoviário é caracterizado por diferentes tipos de veículos, e, devido às suas características, têm diferente influência no desempenho da infraestrutura rodoviária. Os veículos mais leves e mais pequenos, circulam a velocidades mais elevadas, enquanto que os veículos mais pesados e de maiores dimensões, tendem a circular a velocidades mais baixas.

Os veículos pesados são, por isso, os veículos com mais probabilidade de causar perturbações no tráfego, devido às suas grandes dimensões e ao seu peso elevado (Figura 1.1), pelo que tendem a adotar menores velocidades e maiores intervalos entre veículos (*headways*) comparativamente aos veículos ligeiros.



(a)

(b)

Figura 1.1 – Peso e dimensão dos veículos pesados: (a) até 45 toneladas; (b) até 74 toneladas (DNIT, 2006)

Verifica-se ainda que essa redução de velocidade tende a ser particularmente agravada em rampas ascendentes de elevada inclinação. Tal característica, reflete-se habitualmente na redução da capacidade e dos níveis de serviço associados às rodovias. Importa assim compreender, quais os fatores que afetam o desempenho dos veículos pesados e, por consequência, estimar os fatores de conversão, em Unidade de Veículo Ligeiro Equivalente (UVE). Estes são utilizados para estimar o número de veículos ligeiros que, impõem uma perturbação na corrente de tráfego, tendo por base diferentes indicadores de desempenho (fluxo, densidade, headways, demoras...) equivalente a um veículo pesado, permitindo assim converter um volume de tráfego misto (composto por veículos ligeiros e veículos pesados), num volume uniforme composto apenas por veículos ligeiros.

Nesta linha de ação, este trabalho de investigação centra-se na estimação de coeficientes de equivalência de veículos pesados em veículos ligeiros equivalentes, tendo por base diferentes características físicas e condições de circulação, em trechos de autoestrada.

O trabalho assenta na aplicação de técnicas de simulação, de forma a potenciar a criação de diferentes cenários de procura de tráfego, designadamente em termos de proporção de veículos pesados. As técnicas de microsimulação permitem isolar as condições de tráfego difíceis de capturar em campo, e replicá-las no simulador de forma a potenciar a quantificação de variáveis fundamentais das correntes de tráfego, nomeadamente velocidade, fluxo e densidade. Assim, foram utilizadas para desenvolver relações entre os indicadores de desempenho para a situação de tráfego misto (para diferentes percentagens de veículos pesados) comparativamente a uma frota constituída unicamente por veículos ligeiros.

Os trabalhos subdividem-se em quatro fases fundamentais:

- Recolha bibliográfica alargada e aprofundada sobre os fatores de conversão de veículos pesados em veículos ligeiros;
- Identificação dos principais fatores explicativos que tendem a afetar o desempenho dos veículos pesados;
- Recorrendo a técnicas de simulação, construção, calibração e validação de um modelo de simulação para suporte de análises comparativas;
- Avaliação do efeito que a comparação do tráfego assume ao nível de um conjunto de indicadores de desempenho da infraestrutura.

1.2 Objetivos do trabalho e metodologia de abordagem

O objetivo deste estudo é avaliar o impacto associado à presença de veículos pesados na normal corrente de tráfego, tendo por base diferentes características da infraestrutura e condições de circulação. A presença de veículos pesados tende a impor uma perturbação adicional à corrente de tráfego afetando, por inerência, o seu desempenho geral.

Atendendo ao número elevado de variáveis e fatores que, podem influenciar o desempenho dos veículos pesados, optou-se por simplificar, considerando-se apenas as de maior importância, de forma a avaliar a qualidade de serviço de correntes de tráfego numa infraestrutura de duas vias, a partir de estimativas de fatores de equivalência. Estes vão simular o comportamento dos veículos considerados, tendo em conta o comportamento dos respetivos condutores, e a geometria da infraestrutura. Irão ser analisados quais os fatores que aumentam o efeito dos veículos pesados sobre os veículos ligeiros, em determinadas condições de tráfego, durante um certo período de tempo e para determinadas variações na geometria da infraestrutura.

Os modelos de microsimulação representam a realidade da rede de infraestruturas, com detalhe elevado, sendo possível controlar as características do tráfego, o comportamento dos condutores, a dinâmica dos veículos e a escolha das rotas (Figueiredo *et al.*, 2014). Foi construído um modelo, para simular um trecho de autoestrada para diferentes condições de tráfego, através do *software* AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks). O modelo de calibração assentou na aplicação comparativa dos resultados simulados com os obtidos empiricamente através das expressões de Wu (2002) e May (1990), para avaliar a necessidade de proceder à variação dos parâmetros de calibração mais relevantes para ajustar os dados empíricos e os dados simulados.

Uma vez que os veículos pesados têm maiores dimensões e baixo desempenho no que diz respeito à aceleração, analisaram-se diferentes características de tráfego e geométricas, para o modelo construído. Para desenvolver as relações entre os indicadores de desempenho de um tráfego com veículos ligeiros e de um tráfego misto, foram escolhidas algumas variáveis fundamentais, entre as quais: percentagens de veículos pesados, relação volume/capacidade, número de vias, velocidade, inclinação e extensão do troço inclinado. Através dos dados simulados, foi possível desenvolver relações entre as variáveis do fluxo, avaliando como estas influenciam o tráfego.

Para avaliar o efeito dos veículos pesados, é necessário estimar os fatores de equivalência, que pode ser feito através de diversos métodos, entre os quais, os métodos baseados no fluxo (John

e Glauz, 1976; Huber, 1982; Krammes e Crowley, 1987; Ingle, 2004; Al-Kaisy e Jung, 2004; Giuffré, 2015; Al-Obaedi, 2016), na velocidade (Ahmed, 2010), no *headway* (Ahmed, 2010; Al-Obaedi, 2016). Estes métodos e alguns dos seus resultados, foram referidos no Capítulo 2. Neste estudo, os métodos usados para determinar o fator UVE, foram os métodos baseados na comparação de fluxos e de velocidades, para a mesma densidade, que foram posteriormente comparados com os resultados obtidos por alguns dos autores referidos.

Para complementar este estudo, pretende-se analisar a situação de existência de uma via de aceleração no início, a meio e no fim do trecho de autoestrada que se tenciona estudar, de modo a perceber qual o efeito que esta perturbação provoca na corrente de tráfego.

1.3 Estrutura da tese

O texto está disposto em 5 capítulos. No Capítulo 1 é feita uma breve introdução ao tema abordado, onde é exposto o objetivo deste estudo e qual a importância do mesmo. São ainda referidos alguns dos fatores que influenciam o tráfego. O Capítulo 2 apresenta os estudos que foram feitos sobre o tema, salientando os métodos utilizados para a estimativa dos fatores de equivalência/conversão e os resultados obtidos em cada um deles. O Capítulo 3 descreve o que foi feito neste estudo: desde a construção do modelo aos métodos utilizados para a estimativa dos fatores de equivalência. O Capítulo 4 contém a análise dos resultados obtidos.

2 LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE

2.1 Considerações Iniciais

De acordo com o Código da estrada (Lei n.º 72/2013 de 3 de setembro) um veículo é considerado pesado quando o seu peso é superior a 3500 kg ou quando tem uma capacidade para transportar mais do que 9 passageiros, incluindo o condutor. Os veículos pesados englobam tanto os de mercadorias, vulgarmente designados por “camião”, como os de passageiros, designados por “autocarro”.

Para minimizar os tempos de viagem associados a deslocações de curta/média distância, os condutores optam por circular nas autoestradas, que lhes proporcionam melhores condições de circulação e de segurança comparativamente às estradas rurais e inter-urbanas, uma vez que se pode circular a velocidades mais elevadas e frequentemente manter a velocidade desejada. Uma auto-estrada é caracterizada por assegurar dois sentidos de tráfego fisicamente separados, pelo menos duas vias em cada direção, nós desnivelados assegurando um fluxo ininterrupto e circulação reservada a veículos motorizados.

Os veículos pesados asseguram uma grande capacidade de transporte, estando habitualmente associados a maiores dimensões e peso comparativamente aos veículos ligeiros, e conseqüentemente, a um menor desempenho nas autoestradas atendendo a que não conseguem atingir os mesmos níveis de aceleração e velocidade.

O HCM (Highway Capacity Manual) 1965 refere que os veículos pesados reduzem a capacidade de um trecho de estrada materializada em termos de número total de veículos transportados por hora, e que o número de veículos ligeiros que cada veículo pesado representa em condições específicas é designado por “veículos ligeiros equivalentes” (UVE) para essas condições. O mesmo documento define veículo ligeiro equivalente como o número de veículos ligeiros deslocados no fluxo de tráfego correspondente a um veículo pesado, de acordo com as condições prevaletentes da estrada e do trânsito (Ahmed, 2010; Al-Kaisy *et al.*, 2002; Al-Kaisy, 2006; Shalini e Kumar, 2014). Mas ao longo dos anos, esta definição tem vindo a evoluir, e na versão do HCM 1985 o conceito é apresentado como “o número de veículos ligeiros que consumiria a mesma percentagem da capacidade das autoestradas do que os camiões, autocarros ou veículos recreacionais sob condições prevaletentes de estrada e do tráfego”, onde já é

inserido o conceito de capacidade (Al-Kaisy, 2006). No HCM 2000, o veículo ligeiro equivalente é considerado como “o número de veículos ligeiros deslocados por um único veículo pesado de um determinado tipo, em determinadas condições de estrada, de tráfego e de controlo” (Al-Kaisy *et al.*, 2002; HCM, 2000; Shalini e Kumar, 2014). Segundo Giuffrè *et al.* (2015), a mais recente versão do HCM (TRB, 2010), estima o efeito que os veículos pesados exercem nos veículos ligeiros sob condições de fluxo livre ou subsaturadas, e fornece diferentes valores do factor UVE para veículos pesados, dependendo da percentagem de veículos pesados, da inclinação e do comprimento do segmento inclinado da estrada.

É de salientar que o HCM (TRB, 2010), quando se refere a veículos pesados, engloba pesados de mercadorias, autocarros e veículos recreacionais, e agrupa os dois primeiros uma vez que eles apresentam características muito semelhantes em autoestradas. Devido a isso, quando se menciona o termo “veículos pesados” no presente estudo, este refere-se a pesados de mercadorias e autocarros, uma vez que os veículos recreacionais não são tão comuns como estes dois.

Para estimar os coeficientes de equivalência, as técnicas de microsimulação permitem desenvolver relações entre os indicadores de desempenho da estrada. Os modelos de microsimulação representam a realidade da rede de infraestruturas, com detalhe elevado, sendo possível controlar as características do tráfego, o comportamento dos condutores, a dinâmica dos veículos e a escolha das rotas (Figueiredo *et al.*, 2014).

2.2 Estimativa dos Coeficientes de Equivalência

2.2.1 Conceito

O HCM nas suas sucessivas versões (TRB, 1950; TRB, 1965; TRB, 1985; TRB, 2000; TRB, 2010) é muito possivelmente a referência internacionalmente mais conceituada no que respeita à definição de coeficientes de conversão entre diferentes tipologias de veículos. Na versão de 2010 (TRB, 2010) refere que, os veículos ligeiros equivalentes têm como objetivo converter um fluxo misto num fluxo constituído unicamente por veículos ligeiros, e o seu conhecimento potencia a determinação da capacidade e o nível de serviço de uma determinada estrada. Essa conversão é feita recorrendo a um fator de ajustamento devido à presença de veículos pesados, tendo por base a seguinte expressão:

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_t \cdot (E_t - 1) + P_r \cdot (E_r - 1)} \quad (2.1)$$

Onde, E_t e E_r são os fatores de equivalência de caminhões/autocarros e de veículos recreacionais em veículos ligeiros, respectivamente; P_t e P_r correspondem à percentagem de caminhões/autocarros e de veículos recreacionais na corrente de tráfego, respectivamente; f_{HV} é o fator de ajuste dos veículos pesados.

2.2.2 Variáveis que influenciam o fator de conversão

Com o objetivo de avaliar a influência dos veículos pesados no desempenho operacional da infraestrutura rodoviária, é necessário conhecer quais os fatores que influenciam o tráfego.

Segundo o *Highway Capacity Manual*, os fatores que afetam a capacidade e o volume de tráfego são as características da via (número de vias, largura, traçado) e as características do tráfego (composição da frota, distribuição do fluxo).

Existem vários estudos que analisam os fatores que influenciam o desempenho dos veículos pesados nas autoestradas. Al-Kaisy *et al.* (2002) concluiu que os veículos pesados afetam o tráfego de duas formas. Primeiro, têm um peso mais elevado e necessitam de mais espaço para circular na estrada do que os veículos ligeiros. Segundo, têm uma aceleração mais lenta, uma baixa capacidade de travagem e mais dificuldade em efetuar manobras, o que leva a efeitos físicos nos veículos ligeiros mais próximos e efeitos psicológicos nos condutores dos mesmos.

O valor do fator Unidade de Veículo Ligeiro Equivalente (UVE) que o HCM 2010 recomenda para a conversão dos veículos pesados em ligeiros é 1,5. Este valor é considerado para terreno plano ou com pequena inclinação (igual ou inferior a 2%), mas varia com os parâmetros inclinação longitudinal, extensão do trainel e percentagem de veículos pesados. Em rampas ascendentes toma um valor máximo de 7,0 para uma inclinação superior a 6%, com comprimento superior a 1,6 km, e para 2% de percentagem de veículos pesados. Para descidas, os valores recomendados podem ser observados no Quadro 2.1. Nas rampas, toma um valor máximo de 7,5 para uma inclinação superior a 6%, com comprimento superior a 6,4 km, e para 5% de percentagem de veículos pesados. Em rampas descendentes, os valores recomendados podem ser observados no Quadro 2.2.

Quadro 2.1 – UVE para veículos pesados (camiões e autocarros) em rampas ascendentes (TRB, 2010)

Upgrade (%)	Length (km)	E _T								
		Percentage of Trucks and Buses								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
< 2	All	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
≥ 2-3	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.8-1.2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 1.2-1.6	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 1.6-2.4	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 2.4	3.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
> 3-4	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5
	> 0.8-1.2	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 1.2-1.6	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 1.6-2.4	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
	> 2.4	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5
> 4-5	0.0-0.4	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	3.0	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 0.8-1.2	3.5	3.0	3.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	> 1.2-1.6	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	> 1.6	5.0	4.0	4.0	4.0	3.5	3.5	3.0	3.0	3.0
> 5-6	0.0-0.4	2.0	2.0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	> 0.4-0.8	4.0	3.0	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
	> 0.8-1.2	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
	> 1.2-1.6	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	> 1.6-2.4	5.5	5.0	4.5	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
	> 2.4	6.0	5.0	5.0	4.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
> 6	0.0-0.4	4.0	3.0	2.5	2.5	2.5	2.5	2.0	2.0	2.0
	> 0.4-0.8	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	> 0.8-1.2	5.0	4.5	4.0	4.0	3.5	3.0	2.5	2.5	2.5
	> 1.2-1.6	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5	3.0	3.0	3.0
	> 1.6-2.4	6.0	5.5	5.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.5	3.5
	> 2.4	7.0	6.0	5.5	5.5	5.0	4.5	4.0	4.0	4.0

Quadro 2.2 – UVE para veículos pesados (camiões e autocarros) em rampas descendentes (TRB, 2010)

Downgrade (%)	Length (km)	E _T			
		Percentage of Trucks			
		5	10	15	20
< 4	All	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
4-5	> 6.4	2.0	2.0	2.0	1.5
> 5-6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 5-6	> 6.4	5.5	4.0	4.0	3.0
> 6	≤ 6.4	1.5	1.5	1.5	1.5
> 6	> 6.4	7.5	6.0	5.5	4.5

Uma vez que o HCM apenas estima o fator UVE para condições de fluxo livre ou subsaturadas, Al-Kaisy e Jung (2004) analisaram os valores de UVE para condições sobressaturadas (congestionamento), obtendo variações significativas nos resultados. Ahmed *et al.* (2010) concluíram que, o efeito dos veículos pesados numa corrente de tráfego tende a ser mais significativa face a condições sobressaturadas. Esta hipótese é baseada no facto de que os ciclos de aceleração e desaceleração, durante um congestionamento ou condições *stop-and-go*, provavelmente impõem uma limitação adicional no desempenho dos veículos pesados, o que leva a que estes se movam lentamente (Al-Kaisy *et al.*, 2002).

Para além das variáveis consideradas no HCM (inclinação longitudinal, extensão do trainel e percentagem de veículos pesados), Al-Kaisy e Jung (2004) estimaram o efeito dos veículos pesados também para a situação de congestionamento, tendo identificado mais dois fatores importantes: a existência de uma via proibida à circulação de um determinado tipo de veículo e a localização do congestionamento (relativamente ao trecho inclinado).

2.2.3 Métodos empregues e principais resultados

Existem vários estudos que comprovam que o factor UVE pode variar relativamente a outros parâmetros. É ainda possível encontrar na bibliografia da especialidade, referência a diferentes métodos para estimar o valor dos UVEs para veículos pesados, os quais serão apresentados em seguida.

Métodos baseados na comparação de fluxos

Os métodos baseados na comparação de fluxos consistem em analisar o fluxo de uma corrente de tráfego constituída apenas por veículos ligeiros e o fluxo de uma corrente mista, constituída por veículos ligeiros e veículos pesados (considerando diferentes percentagens de veículos pesados), para posteriormente compará-los, obtendo assim o valor do fator UVE para determinadas condições de tráfego e geométricas, e avaliar o efeito dos veículos pesados sobre as correntes de tráfego.

Al-Kaisy e Jung (2004) usaram dados recolhidos em campo e simulações de tráfego para analisar o efeito dos veículos pesados. Para o modelo de simulação foram utilizadas inclinações variáveis entre 0 e 6%, extensões de traineis entre 0,2 e 2,0 km e percentagens de veículos pesados entre 2 e 25%. Foram também consideradas quatro situações: sem restrições na utilização das vias; a via da esquerda é proibida à circulação de veículos pesados; as vias da esquerda e a central são proibidas a veículos pesados; a via da esquerda é proibida a todos os

veículos pesados enquanto que a via central é proibida a veículos pesados com maior comprimento. A proibição do uso de vias por parte de veículos pesados é por vezes implementado em autoestradas para limitar o número de manobras de mudança de via, minimizando a interação entre veículos pesados e outros veículos presentes no fluxo de tráfego (Alecsandru *et al.*, 2012). Os autores (Al-Kaisy e Jung, 2004) ainda integraram uma nova variável para além das que foram consideradas: consideraram duas localizações para o congestionamento, no topo e na base do segmento inclinado.

Para a variável inclinação, concluíram que: (1) o fator UVE aumenta com o aumento da inclinação; (2) o efeito da inclinação é mais significativo em rampas com maior comprimento e para pequenas percentagens de veículos pesados; (3) o efeito dos veículos pesados diminui significativamente quando a percentagem de veículos pesados aumenta para valores superiores a 20%. Relativamente ao comprimento do segmento inclinado, o efeito é significativo para maiores inclinações e é quase desprezável para maiores percentagens de veículos pesados. Isto deve-se ao facto dos veículos pesados terem baixa capacidade de aceleração, circulando em marcha lenta nas rampas mais íngremes (Al-Obaedi, 2016; TRB 2000). No que diz respeito à percentagem de veículos pesados, Al-Kaisy e Jung (2004) concluíram que, para terrenos planos ou com pouca inclinação (até 3%), o fator UVE aumenta com o aumento da percentagem de veículos pesados, e para inclinações mais elevadas, diminui com o aumento da mesma. Isto ocorre porque os veículos pesados ocupam mais espaço na estrada, o que aumenta a probabilidade de ocupação das duas vias no local do congestionamento, aumentando a impedância para o tráfego e a probabilidade de chegadas sucessivas de veículos pesados, possibilitando a formação de pelotões.

Perante os vários cenários da restrição de utilização de vias, verificou-se que o fator UVE aumenta quando as vias da esquerda e central (considerando 3 vias) não permitem a circulação de veículos pesados. A situação mais favorável corresponde àquela em que a via da esquerda é proibida a todos os veículos pesados e a via central é proibida aos veículos pesados de maiores dimensões, uma vez que os veículos ligeiros são menos afetados pela impedância dos veículos pesados de grande porte.

Relativamente ao congestionamento, o estudo concluiu que, quando este se localiza na base da rampa, as filas de espera se prolongam a montante da rampa, onde o terreno ainda é plano. Quando este se localiza no topo da rampa (ou noutra ponta desta), as filas formam-se ao longo do segmento inclinado, podendo estender-se até montante da rampa. Assim, verificou-se que o fator UVE é mais elevado quando o congestionamento se localiza no topo do segmento

inclinado. O aumento é mais significativo para baixas percentagens de veículos pesados, logo o segundo cenário tem maior efeito dos veículos pesados do que o primeiro.

Com o objetivo de estimar o fator UVE, Ahmed (2010) utilizou o método baseado na comparação do fluxo, concluindo que este método era apropriado para calcular o fator UVE quando se consideram os níveis de serviço, que não é o caso, uma vez que se estimou os UVEs apenas sob condições de fluxo constante.

Para estimar o fator UVE para os veículos pesados em situações de congestionamento, Al-Kaisy *et al.* (2002), selecionaram duas localizações para a recolha de dados: a primeira localizou-se a jusante de um segmento inclinado (rampa), não afetando o fluxo ou a composição do tráfego, mas afetando as velocidades se estas tivessem sido consideradas; a segunda localizou-se a montante da rampa e foram usadas duas categorias, uma para veículos com comprimento inferior a 6,5 metros e outra para veículos com comprimento superior a este (veículos pesados).

Foi possível concluir que na primeira localização o fator UVE médio obtido foi 2,36, valor mais elevado comparativamente ao apontado pelo HCM 2010 (1,5) e que o efeito dos veículos pesados no fluxo de descarga é maior quando a estrada opera em condições de fluxo livre. Também foi introduzida a variabilidade climática (tempo seco e húmido) e a existência de trabalhos de manutenção na estrada. Para o primeiro cenário, verificou-se que o fator UVE não foi afetado. Na segunda localização, o fator UVE médio obtido foi de 3,21 numa direção e 2,7 na outra, sendo maior do que o previsto pelo HCM 2010 (2,0), que se atribui à perturbação adicional causada pelos veículos pesados, atingindo a rampa com uma velocidade baixa, enquanto que o fator UVE considerado no HCM é baseado em condições de fluxo livre. Em geral, o efeito dos veículos pesados na corrente de tráfego é maior durante o congestionamento, e em particular no fluxo de chegada, do que em situações de fluxo livre.

É ainda importante referir que os autores deste estudo recomendam o uso de fatores UVE mais realistas para veículos pesados para calcular o fluxo de chegada, e que se deve considerar um UVE de 2,5 para autoestrada em terreno nivelado pois é um valor conservativo sob condições normais e durante a construção.

Mais tarde, Al-Kaisy e Rakha (2005) usaram uma relação peso/potência de 85 kg/kW para representar um tráfego misto em autoestradas. Neste trabalho, definiram-se valores para o fator UVE, em regime sobressaturado, onde se teve em atenção a inclinação e extensão da rampa e a percentagem de veículos pesados. Concluíram que os valores obtidos neste estudo (Quadro

2.3) são semelhantes aos valores do HCM 2010, apesar destes serem estimados para situação em regime livre.

Quadro 2.3 – Valores propostos para o fator UVE em condições sobressaturadas (Al-Kaisy e Rakha, 2005)

Upgrade (%)	Length (km)	E_T								
		Percentage of Trucks and Buses								
		2	4	5	6	8	10	15	20	25
<2	All	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.5	2.7
2	0.0 - 0.4	2.8	2.9	3.1	3.1	3.1	3.2	3.2	3.1	3.0
	> 0.4 - 0.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.1	3.3	3.2	3.1	2.9
	> 0.8 - 1.2	2.9	3.1	3.2	3.1	3.2	3.1	3.1	3.1	3.0
	> 1.2 - 1.6	2.9	3.1	3.1	3.0	3.2	3.3	3.1	3.0	2.9
	> 1.6 - 2.4	3.5	3.1	3.3	3.2	3.1	3.2	3.1	3.0	3.0
	> 2.4	4.2	3.5	3.3	3.4	3.3	3.3	3.2	3.0	2.9
3	0.0 - 0.4	3.0	3.5	3.3	3.3	3.3	3.4	3.2	3.2	3.0
	> 0.4 - 0.8	3.6	3.6	4.1	3.7	3.5	3.3	3.4	3.3	3.4
	> 0.8 - 1.2	3.0	3.3	4.0	3.4	3.7	3.6	3.4	3.1	3.3
	> 1.2 - 1.6	4.2	3.4	5.0	4.0	3.7	3.4	3.4	3.2	3.0
	> 1.6 - 2.4	4.6	3.5	4.7	4.7	3.7	3.5	3.4	3.2	3.1
	> 2.4	5.8	3.9	4.2	4.5	4.0	3.5	3.3	3.2	3.0
4	0.0 - 0.4	3.1	3.9	3.6	3.6	3.7	3.6	3.6	3.4	3.1
	> 0.4 - 0.8	4.8	4.1	4.2	3.8	4.1	4.0	3.9	3.5	3.3
	> 0.8 - 1.2	4.8	4.3	4.4	4.4	4.4	4.0	3.7	3.4	3.3
	> 1.2 - 1.6	5.5	4.1	4.3	4.0	4.8	3.7	3.7	3.5	3.3
	> 1.6	5.4	4.8	4.6	4.0	4.5	3.9	3.9	3.4	3.3
5	0.0 - 0.4	4.1	4.3	4.0	4.2	4.1	4.2	3.8	3.7	3.5
	> 0.4 - 0.5	4.7	4.6	4.5	4.9	4.7	4.7	4.3	3.8	3.6
	> 0.5 - 0.8	3.5	4.7	6.1	5.1	4.2	4.4	4.3	3.7	3.6
	> 0.8 - 1.2	5.9	6.3	5.9	5.7	5.4	4.7	4.3	3.8	3.5
	> 1.2 - 1.6	5.8	7.3	6.4	6.1	5.3	5.0	4.2	4.0	3.4
	> 1.6	6.8	7.7	7.0	6.7	5.4	5.4	4.2	3.7	3.5
6	0.0 - 0.4	4.7	4.9	5.6	4.9	5.4	5.0	4.5	4.5	3.8
	> 0.4 - 0.5	6.0	6.7	6.5	6.1	6.6	6.3	4.9	4.4	4.0
	> 0.5 - 0.8	7.3	6.9	6.9	7.2	6.5	6.0	5.1	4.5	4.3
	> 0.8 - 1.2	10.7	9.2	6.8	7.7	6.4	6.1	5.4	4.7	4.3
	> 1.2 - 1.6	10.3	9.4	8.6	8.3	7.9	7.7	5.7	4.7	4.1
	> 1.6	13.4	12.6	12.8	9.9	8.1	7.8	6.0	4.8	4.5

Também Ingle (2004) estimou o fator UVE para segmentos básicos de autoestrada, analisando as variáveis relação peso/potência, potência dos pesados, percentagem de veículos pesados, tipo e condições do pavimento, tratamento aerodinâmico de veículos pesados, número de vias, limite de velocidade dos veículos pesados e nível de congestionamento. O objetivo deste estudo foi verificar as seguintes hipóteses:

1. Uma única população de camiões, contendo apenas uma relação peso/potência, irá ter o mesmo desempenho que uma população de múltiplos camiões, contendo mais do que uma relação peso/potência;
2. O UVE para uma população real de veículos pesados, diminui com o aumento da percentagem destes (considerando uma percentagem de 25% de pesados);
3. O UVE para os veículos pesados irá variar com o tipo e condições do pavimento;

4. O tratamento aerodinâmico dos pesados irá ter um efeito significativo no cálculo dos UVE;
5. Os pesados nas autoestradas com mais de duas vias direccionais irão ter menores valores UVE do que os pesados estradas com duas vias apenas;
6. A imposição de um limite de velocidade abaixo da velocidade limite de todos os outros veículos resulta num UVE mais elevado;
7. O aumento do nível de serviço irá resultar num aumento do UVE.

Para a primeira hipótese, verificou-se que a relação peso/potência da população de veículos pesados tem um efeito significativo no fator UVE. Obtiveram-se variações entre 1,5 e 3,0 para uma inclinação de rampa de 2% com um comprimento de 0,8 km, e variações de 2,0 a 8,0 para uma inclinação de 6% com um comprimento de 1,6 km. Assim, verifica-se que o efeito da relação peso/potência é mais pronunciado para troços inclinados e mais longos. Comparando o efeito de uma população de pesados com duas populações diferentes (duas relações peso/potência), verificou-se que os resultados destas duas análises são semelhantes para percentagens de veículos pesados superiores a 5%, sendo a diferença significativa para percentagens inferiores a esta.

Variando a percentagem de veículos pesados, Ingle (2004) verificou a segunda hipótese. Através do Quadro 2.4, é possível confirmar que o fator UVE diminui com o aumento da percentagem de veículos pesados, mas a partir dos 60% essa diminuição deixa de ser significativa uma vez que a interação com os veículos ligeiros diminui.

Quadro 2.4 – Variação do UVE com a percentagem de veículos pesados na corrente de tráfego (Ingle, 2004)

Inclinação	Comprimento	Percentagem de Veículos Pesados (%)										
		5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
4 %	0,8 km	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	1,6 km	3,5	3,0	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	1,5	1,5	1,5	1,5
6 %	0,8 km	4,0	3,5	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
	1,6 km	6,0	4,5	3,0	3,0	3,0	2,5	2,5	2,0	2,0	2,0	2,0
8 %	0,8 km	7,0	5,0	4,0	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0
	1,6 km	8,0	5,5	4,5	4,0	3,5	3,0	3,0	2,5	2,5	2,5	2,0

O autor também verificou que o tipo e as condições do pavimento têm um efeito significativo para uma percentagem de veículos pesados de 5%, uma vez que o UVE em pavimentos conservados apresentou muito menos variabilidade devido aos coeficientes de rolamento e de atrito serem próximos do valor padrão. O efeito do pavimento diminui à medida que aumenta

a percentagem de veículos pesados. Assim, a terceira hipótese também é verificada. Em relação ao tratamento aerodinâmico dos veículos pesados, o maior efeito ocorreu para uma percentagem de 10%, diminuindo à medida que a percentagem de veículos pesados aumenta, confirmando assim a quarta hipótese. Concluiu ainda que o número de vias também influencia o fator UVE uma vez que, para três vias, se aumentam as oportunidades de ultrapassagem. Foi ainda analisada a hipótese de imposição de restrição ao uso de uma determinada via pelos veículos pesados, não se tendo registado qualquer efeito significativo.

Quando imposto um limite de velocidade aos veículos pesados, o valor do UVE altera-se significativamente, sendo 32% maior do que o UVE calculado sem qualquer limite de velocidade. O maior efeito ocorreu para 5% de veículos pesados e diminui com o aumento da percentagem de pesados. Por último, foi verificada também a sétima hipótese, uma vez que o UVE é mais baixo para o nível de serviço B e é mais crítico para os níveis de serviço D e E, onde o fluxo de tráfego é maior. É de salientar que foi usada a densidade média como fator determinante do nível de serviço e que o fator UVE fornecido pelo HCM 2000 foi calculado para um nível de serviço C. Para todas as análises anteriormente referidas, o autor considerou apenas uma população de veículos pesados com a mesma relação peso/potência (83,7 kg/kW) e um nível de serviço C. Também foi feita uma análise onde se fez variar a inclinação de um troço de estrada, verificando-se que o UVE aumenta com o aumento da inclinação, tal como indica o Quadro 2.5.

Quadro 2.5 – Variação do UVE com a inclinação longitudinal do trecho (Ingle, 2004)

Percentagem de pesados	Comprimento	Inclinação Longitudinal (%)							
		1	2	3	4	5	6	7	8
5 %	0,4 km	1,5	1,5	2,0	2,0	2,5	3,0	3,8	4,5
	0,8 km	1,5	1,5	2,0	2,5	3,0	4,5	5,8	7,0
	1,2 km	1,0	1,5	2,5	3,5	3,5	5,5	6,8	8,0
	1,6 km	1,5	2,0	3,0	3,5	4,0	6,0	7,0	8,0
	2,0 km	1,5	2,0	2,5	4,0	4,0	6,0	6,8	7,5
	2,4 km	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,5	7,3	8,0

Ingle (2004) ainda analisou vários comprimentos para o troço inclinado, de modo a determinar o UVE para cada situação (Quadro 2.6). Verificou-se que o UVE muda mais acentuadamente para comprimentos de rampas mais íngremes e que essa variação é maior para uma percentagem de veículos pesados de 5%. Para inclinações mais baixas e para comprimentos mais longos (de 3,40 a 9,40 km), a variação do UVE não é significativa. Também foi feita uma combinação de efeitos com a relação peso/potência, o tipo e condições do pavimento e o nível de serviço. Fez

um primeiro estudo onde considerou uma população de pesados com uma relação peso/potência de 106,6 kg/kW, circulando numa estrada de pavimento betuminoso pobre e com um nível de serviço D. No segundo estudo considerou uma relação peso/potência de 68,5 kg/kW, para uma população de pesados que circula num pavimento betuminoso de excelente qualidade e com um nível de serviço B. Este efeito combinado das características da estrada e do tráfego resulta em erros no fluxo, à exceção das inclinações mais íngremes, onde o erro é aceitável.

Quadro 2.6 – Variação do UVE com o comprimento do trecho inclinado (Ingle, 2004)

Inclinação Longitudinal	Percentagem de pesados	Comprimento do trecho (m)									
		0,40	1,40	2,40	3,40	4,40	5,40	6,40	7,40	8,40	9,40
2 %	5 %	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,2	2,3	2,5
	10 %	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
4 %	5 %	2,0	3,5	4,0	4,5	4,7	4,8	5,0	5,0	5,0	5,0
	10 %	2,0	3,0	3,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,7	3,8	4,0
6 %	5 %	3,0	5,5	6,5	6,5	6,7	6,8	7,0	7,2	7,4	7,5
	10 %	2,5	4,0	5,0	5,0	5,2	5,3	5,5	5,5	5,5	5,5

Também Cunagin e Messer (1983) estudaram esta questão. Analisaram três tipos de ondulação do terreno: plana, inclinação moderada e inclinação íngreme. Complementarmente, tiveram ainda em conta a percentagem de veículos pesados e os níveis de volume correspondentes a cada nível de serviço. Para inclinação plana e moderada, o fator UVE aumentou com a percentagem de veículos pesados e com os níveis de serviço em terreno plano, enquanto que este diminui para maiores percentagens de pesados nas inclinações mais íngremes.

Cunha e Setti (2011) usaram a densidade da corrente de tráfego para medir a qualidade de serviço de uma autoestrada no Brasil, onde o fator UVE foi obtido através da comparação entre duas correntes de tráfego com a mesma densidade. Através dos modelos de simulação utilizados (descritos no subcapítulo 2.3) foi possível definir fluxos para cada nível de serviço e determinar o fator UVE para velocidades em regime livre de 100 e 110 km/h (Quadro 2.7 e Quadro 2.8). Embora fosse expectável que os valores do UVE se mantivessem constantes, tal como no HCM 2000, verificou-se que estes aumentavam à medida que o nível de serviço se agravava. Identificam-se outros trabalhos que também confirmam estes resultados (Elefteriadou *et al.*, 1997; Webster e Elefteriadou, 1999; Ingle, 2004). Concluiu-se que os veículos pesados com características de desempenho mais baixas e maiores percentagens de pesados são alguns dos aspetos que devem ser incluídos na determinação do fator UVE. Com base nas quatro categorias de camiões consideradas e nos dados recolhidos, os resultados sugerem que o UVE deve ser fornecido para percentagens de pesados entre 10 a 50%.

Quadro 2.7 – Veículos ligeiros equivalentes para veículos pesados em segmentos inclinados específicos no Brasil, para uma velocidade em regime livre de 110 km/h (Cunha e Setti, 2011)

LOS	Percent trucks	Grade magnitude and length (km)														
		0%			2%			4%			6%			8%		
		0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00
A	10%	1.0	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	1.2	1.7	2.8	1.3	3.0	4.5	1.9	4.9	6.3
	20%	1.0	1.1	1.1	1.1	1.3	1.4	1.2	1.7	2.4	1.3	2.5	3.7	1.6	3.9	4.9
	30%	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.4	1.2	1.7	2.3	1.3	2.5	3.3	1.5	3.4	4.2
	40%	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.5	1.2	1.7	2.3	1.3	2.4	3.2	1.5	3.2	3.9
	50%	1.1	1.1	1.2	1.1	1.4	1.5	1.2	1.7	2.3	1.3	2.4	3.0	1.5	3.1	3.6
B	10%	1.1	1.2	1.4	1.2	1.5	1.8	1.4	2.5	4.0	1.7	4.2	5.9	2.3	6.2	7.9
	20%	1.1	1.2	1.4	1.2	1.6	1.9	1.4	2.4	3.2	1.6	3.4	4.5	2.1	4.6	5.7
	30%	1.2	1.3	1.4	1.3	1.7	2.0	1.4	2.3	2.8	1.7	3.0	3.9	2.1	4.0	4.7
	40%	1.2	1.4	1.5	1.3	1.8	2.0	1.5	2.2	2.7	1.9	2.9	3.5	2.1	3.6	4.4
	50%	1.2	1.6	1.7	1.4	1.9	2.0	1.8	2.2	2.7	1.9	2.8	3.3	2.0	3.4	4.1
C	10%	1.3	1.5	2.0	1.5	2.6	3.0	1.9	3.7	5.3	2.5	5.6	7.9	3.2	8.1	10.0
	20%	1.5	1.8	2.0	1.8	2.3	2.8	2.0	3.1	4.1	2.4	4.3	5.4	2.9	5.6	6.6
	30%	1.7	1.9	2.0	1.8	2.3	2.6	2.1	3.0	3.6	2.4	3.8	4.4	2.8	4.6	5.3
	40%	1.7	2.0	2.0	1.9	2.3	2.6	2.1	2.9	3.3	2.7	3.4	3.9	3.1	4.1	4.8
	50%	1.8	2.0	2.1	2.0	2.5	2.7	2.5	2.9	3.1	2.6	3.2	3.6	2.9	3.9	4.5
D	10%	2.3	2.9	3.2	2.5	3.7	4.2	3.0	4.7	6.5	3.8	6.7	8.6	4.2	8.8	10.9
	20%	2.1	2.6	2.6	2.4	3.0	3.5	2.7	3.9	4.6	3.1	4.9	5.8	3.8	6.0	6.8
	30%	2.2	2.6	2.6	2.3	2.9	3.1	2.8	3.4	3.9	3.0	4.1	4.7	3.5	4.8	5.4
	40%	2.2	2.5	2.5	2.4	2.8	2.9	2.7	3.2	3.6	3.3	3.5	4.1	3.7	4.6	4.8
	50%	2.2	2.6	2.5	2.4	2.9	3.0	2.8	3.3	3.5	3.1	3.5	3.7	3.5	4.2	4.6
E	10%	2.6	3.5	3.9	3.0	4.2	4.6	3.7	4.8	6.3	4.0	7.3	7.9	4.4	7.9	10.1
	20%	2.4	3.0	2.9	2.7	3.3	3.5	2.8	4.1	4.4	3.5	4.9	5.5	4.1	5.5	6.1
	30%	2.3	3.0	2.8	2.6	3.0	3.1	3.1	3.4	3.6	3.5	4.2	4.5	3.6	4.6	4.9
	40%	2.3	2.7	2.6	2.6	3.0	2.9	2.9	3.2	3.3	3.5	3.5	3.9	3.8	4.5	4.6
	50%	2.4	2.8	2.6	2.6	3.0	3.0	2.9	3.4	3.3	3.2	3.5	3.6	3.7	4.0	4.2

Quadro 2.8 - Veículos ligeiros equivalentes para veículos pesados em segmentos inclinados específicos no Brasil, para uma velocidade em regime livre de 100 km/h (Cunha e Setti, 2011)

LOS	Percent trucks	Grade magnitude and length (km)														
		0%			2%			4%			6%			8%		
		0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00	0.50	1.25	2.00
A	10%	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.7	2.4	1.4	2.9	3.9	1.7	4.4	5.5
	20%	1.0	1.0	1.0	1.1	1.2	1.3	1.2	1.7	2.3	1.3	2.5	3.4	1.6	3.6	4.4
	30%	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.3	1.2	1.7	2.2	1.3	2.5	3.1	1.5	3.3	3.8
	40%	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	1.2	1.7	2.2	1.3	2.3	2.9	1.5	3.1	3.5
	50%	1.1	1.1	1.1	1.1	1.3	1.4	1.2	1.7	2.2	1.3	2.3	2.8	1.5	2.9	3.3
B	10%	1.2	1.2	1.2	1.3	1.5	1.7	1.4	2.4	3.7	1.7	4.0	5.4	2.3	5.8	7.1
	20%	1.2	1.2	1.2	1.3	1.6	1.8	1.4	2.3	3.0	1.7	3.3	4.1	2.1	4.4	5.1
	30%	1.2	1.2	1.3	1.3	1.6	1.8	1.4	2.1	2.7	1.7	3.0	3.5	2.1	3.8	4.4
	40%	1.2	1.3	1.4	1.3	1.7	1.8	1.4	2.1	2.6	1.7	2.8	3.2	2.0	3.5	4.0
	50%	1.2	1.4	1.5	1.3	1.7	1.9	1.4	2.1	2.5	1.7	2.6	3.1	2.0	3.3	3.8
C	10%	1.3	1.4	1.5	1.6	2.1	2.6	2.0	3.7	4.8	2.3	5.4	7.0	3.4	7.4	9.0
	20%	1.4	1.5	1.6	1.6	2.1	2.6	2.0	3.0	3.7	2.3	4.1	5.0	2.8	5.2	5.9
	30%	1.5	1.8	1.8	1.8	2.1	2.4	2.0	2.8	3.3	2.3	3.6	4.1	2.7	4.4	5.0
	40%	1.7	1.9	1.9	1.8	2.2	2.4	2.0	2.7	3.0	2.3	3.2	3.7	2.7	4.0	4.4
	50%	1.7	1.9	1.9	1.9	2.2	2.4	2.1	2.6	2.9	2.4	3.1	3.5	2.7	3.7	4.1
D	10%	2.1	2.2	2.5	2.2	3.1	3.8	2.5	4.7	6.2	3.3	6.6	8.4	4.5	8.5	10.5
	20%	2.1	2.3	2.4	2.3	3.0	3.3	2.6	3.8	4.5	3.2	4.8	5.6	3.6	5.9	6.6
	30%	2.1	2.4	2.4	2.3	2.9	3.0	2.6	3.5	3.8	3.2	4.0	4.4	3.6	4.8	5.5
	40%	2.1	2.5	2.4	2.4	2.8	2.8	2.6	3.1	3.4	3.0	3.6	4.0	3.4	4.3	4.7
	50%	2.2	2.5	2.4	2.4	2.7	2.9	2.6	3.0	3.2	2.9	3.4	3.7	3.2	4.0	4.4
E	10%	2.2	2.6	3.3	2.8	3.5	3.9	3.1	5.0	6.4	3.3	6.5	8.5	4.8	8.5	10.8
	20%	2.2	2.7	2.8	2.7	3.0	3.5	3.0	3.8	4.7	3.3	5.0	5.5	3.9	5.8	6.4
	30%	2.3	2.7	2.7	2.7	3.0	3.2	3.0	3.7	4.0	3.6	4.1	4.3	3.9	4.7	5.2
	40%	2.3	2.7	2.6	2.7	3.0	3.2	3.0	3.3	3.4	3.3	3.5	3.8	3.5	4.3	4.4
	50%	2.3	2.7	2.6	2.7	3.0	3.2	3.0	3.1	3.2	3.1	3.3	3.5	3.4	4.0	4.3

Usando o mesmo método, o fator UVE foi calibrado de tal modo que o fluxo de tráfego misto produzisse a mesma relação v/c do que um fluxo homogêneo de veículos ligeiros (Linzer *et al.*, 1979). O resultado indicou que o valor do UVE não se altera significativamente para as alterações na relação v/c e com a velocidade de base da autoestrada, tendo-se ainda verificado que o UVE diminui quando a percentagem de veículos pesados aumenta.

De facto é expectável que com o aumento da percentagem de pesados na via, e a inerente formação de pelotões deste tipo de veículo, se potencie a redução da interação com os veículos ligeiros. St John e Glauz (1976) propuseram um fator não linear para pesados, concluindo que o impacto dos pesados no fluxo de tráfego é menor com o aumento da percentagem de pesados na estrada.

Para avaliar o efeito da intensidade da precipitação no fluxo tráfego, Alhassan e Ben-Edigbe (2012) recolheram dados de tráfego durante períodos de chuva, entre os quais a velocidade, direção do tráfego, distância entre veículos, intervalos de passagem, distância entre eixos e classe do veículo. A intensidade da chuva foi dividida em três regimes: chuva leve, chuva moderada e chuva forte, consoante o esquema da Organização Meteorológica Mundial (OMM). A maioria das pesquisas sobre os valores do UVE são para veículos pesados, e são baseadas em condições sobressaturadas em interseções, segmentos inclinados, zonas de trabalhos, períodos de hora de ponta, etc., enquanto que neste estudo foi selecionada uma secção básica para fluxos de hora de ponta que são desprovidas de incidências e analisado se a precipitação influencia os valores do UVE. Neste estudo, a percentagem de veículos pesados foi de 3,51%. Os resultados obtidos permitiram concluir que todos os valores do UVE diminuíram com o aumento da intensidade da chuva, enquanto que, geralmente, o intervalo médio entre veículos pesados aumenta. Segundo os autores, tal deve-se à baixa percentagem de veículos pesados na corrente de tráfego, ao aumento da velocidade dos veículos de menor dimensão em condições de chuva e ao regime livre características da autoestrada durante o período de observação. Segundo os autores, em períodos não congestionados, a presença da chuva tende a melhorar o desempenho dos veículos pesados.

Mais recentemente, Giuffrè *et al.* (2015), usaram o método de Huber (1982) para estimar o fator UVE, simulando uma corrente de tráfego com veículos ligeiros apenas, desde a condição de fluxo livre até à densidade crítica, e posteriormente, uma corrente de tráfego mista com diferentes percentagens de veículos pesados. O objetivo deste estudo foi perceber a influência de uma variabilidade das condições de tráfego, do desenho rodoviário e características do veículo, tal como determinar um conjunto de valores para o fator UVE, a utilizar na análise de secções correntes de autoestradas. O fator UVE foi obtido através da comparação do fluxo

obtido para a entrada de fluxos de tráfego de veículos ligeiros apenas (Q_B) com o valor do fluxo (Q_M) de tráfego de procura para uma percentagem (P_t) de veículos pesados:

$$E_t = \frac{1}{P_t} \cdot \left(\frac{Q_B}{Q_M} - 1 \right) + 1 \quad (2.2)$$

Foram adotados diferentes cenários de análise onde se fez variar a proporção de veículos pesados (100% de veículos ligeiros, 10%, 20%, 30% de veículos pesados), a variação da inclinação longitudinal e a extensão do trecho. O estudo limitou-se a situação não saturada, pelo que os valores do UVE foram limitados a $Q_M < 3000$ veic/h/2 vias. Os resultados mostraram que: (1) o efeito dos veículos pesados tende a aumentar com o aumento do fluxo de tráfego, em segmentos inclinados; (2) o aumento do fluxo de tráfego leva ao aumento do efeito dos veículos pesados; (3) para o mesmo comprimento do trecho inclinado, o efeito dos veículos pesados é maior para valores de fluxo de tráfego mais elevados, o que também acontece para a inclinação; (4) com o aumento da percentagem de veículos pesados, o efeito destes diminui ligeiramente nas operações de tráfego, principalmente quando o fluxo de tráfego é superior a 2000 veic/h/2 vias. Os valores do UVE obtidos neste estudo (Quadro 2.9) são semelhantes aos do HCM (2010) para segmentos inclinados, especialmente para valores de fluxo de tráfego baixos (< 2000 veic/h/via), enquanto que o fator UVE é maior para inclinações mais íngremes, para trechos mais extensos, e para um fluxo de tráfego mais elevado. Isto deve-se ao facto de que, os UVEs no HCM são obtidos com base na velocidade do tráfego (Linzer *et al.*, 1979), enquanto que nesta pesquisa eles são baseados na densidade de tráfego.

Quadro 2.9 – Estimativa do fator UVE para diferentes inclinações e fluxos de tráfego (Giuffrè *et al.*, 2015)

Grade	length of grade [km]	Flow rate [veh/h/2 lanes] and percent heavy vehicles [%]								
		$Q_M \leq 1000$			$1000 < Q_M \leq 2000$			$2000 < Q_M \leq 3000$		
		10	20	30	10	20	30	10	20	30
level	1	1.1	1.4	1.4	1.2	1.5	1.5	1.8	1.7	1.6
	2	1.1	1.4	1.4	1.2	1.5	1.5	1.8	1.7	1.6
up-grade 2%	1	1.2	1.5	1.3	1.3	1.5	1.5	1.6	1.6	1.6
	3	1.2	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.8	1.7	1.7
	5	1.2	1.6	1.6	1.4	1.6	1.6	1.8	1.8	1.7
up-grade 3%	1	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	1.8	1.7	1.6
	3	1.3	1.5	1.5	1.4	1.6	1.6	1.9	1.7	1.6
	5	1.4	1.5	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	1.8	1.7
up-grade 5%	1	1.3	1.5	1.5	1.4	1.5	1.5	2.0	1.7	1.6
	3	1.4	1.5	1.7	1.5	1.6	1.6	2.0	1.8	1.8
	5	1.5	1.6	1.7	1.6	1.6	1.7	2.0	1.8	1.8
down-grade 3%	2	1.1	1.4	1.5	1.3	1.5	1.5	1.8	1.6	1.6
	3	1.0	1.3	1.4	1.2	1.5	1.6	1.8	1.8	1.7
down-grade 5%	2	1.1	1.4	1.5	1.3	1.5	1.6	1.9	1.8	1.7

Os autores sugerem que é necessário confirmar estes resultados e aconselham o desenvolvimento de trabalhos complementares alargando a análise a outros tipos de veículos pesados (camiões multi-reboque, etc), a novos cenários de tráfego e/ou considerar outras variáveis geométricas.

Métodos baseados na comparação de velocidades

Chandra *et al.* (1994) utilizou o método baseado na diferença de velocidades entre duas correntes de tráfego quando operam com densidades iguais. Com o objetivo de medir a velocidade, três ou quatro veículos em cada categoria foram selecionados aleatoriamente durante a parte saturada e a sua velocidade média foi utilizada na análise, através da seguinte expressão:

$$UVE = \frac{V_c / V_i}{A_c / A_i} \quad (2.3)$$

Onde, V_c representa a velocidade média de uma corrente mista, V_i representa a velocidade média causado por uma corrente com veículos ligeiros apenas, A_c representa a área de um veículo ligeiro e A_i a área de um veículo pesado.

Os autores consideraram, três classes diferentes de veículos pesados: autocarros, camiões com 2 eixos e camiões com 3 eixos. Concluíram que a velocidade depende do volume total do tráfego misto e que o fator UVE aumenta com a percentagem de autocarros e diminui com o aumento da percentagem de camiões de 2 eixos, como é apresentado na Figura 2.1.

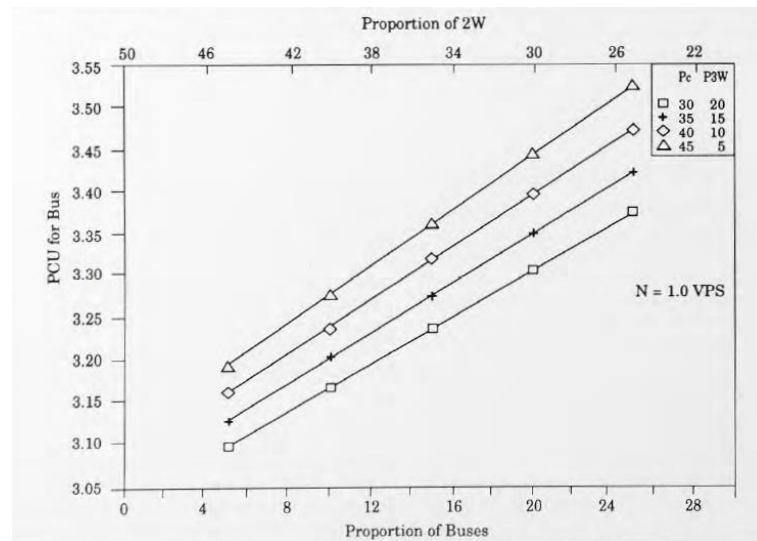


Figura 2.1 – Valores UVE para a percentagem de veículos pesados (Chandra *et al.*, 1994)

Métodos baseados na comparação de *headways*

Alguns autores optam pelo método baseado na comparação do *headway* (Seguin *et al.*, 1982) para calcular o fator UVE. Neste método o UVE é definido pelo quociente entre o *headway* do veículo do tipo *i* e o *headway* de um veículo ligeiro. O *headway* foi medido desde o pára-choque traseiro do veículo líder até ao pára-choque traseiro do veículo seguidor, incluindo o comprimento do veículo seguidor. Este método é o mais apropriado para segmentos de autoestradas (Krammes e Crowley, 1986) uma vez que explica o efeito do pesado devido às suas dimensões e desempenho, e o impacto psicológico que provoca nos condutores dos outros veículos. Os autores concluíram que o aumento da percentagem de veículos pesados provocará fatores UVE mais elevados, uma vez que a interação entre os veículos também aumenta.

Ahmed (2010) também utilizou o método baseado no intervalo entre veículos sucessivos na corrente de tráfego, onde o fator de equivalência foi determinado através da seguinte expressão:

$$UVE = \frac{h_t}{h_c} \quad (2.4)$$

Onde, h_t é o *headway* de um tráfego com veículos pesados e h_c é o *headway* quando há saturação, de um tráfego de veículos ligeiros apenas.

O autor concluiu que o fator UVE aumenta com o aumento da percentagem de veículos pesados, como se pode verificar na Figura 2.2, e atinge um valor de 1,78 para percentagens superiores a 9%.

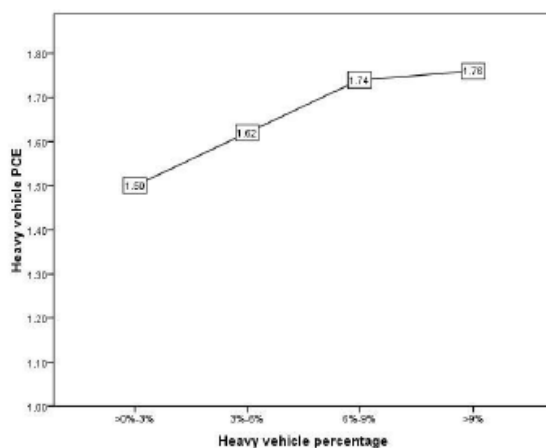


Figura 2.2 – Valores UVE para a percentagem de veículos pesados (Ahmed, 2010)

Segundo West e Thurgood (1995), esta equação tem em conta o efeito da dimensão dos pesados e das características de baixa aceleração, referindo ainda que os condutores dos veículos ligeiros que seguem um pesado mantém maiores intervalos comparativamente a veículos ligeiros que seguem outros ligeiros, pelo que é expectável que o fator UVE seja maior do que 1.

Al-Obaedi (2016) usou o método baseado na comparação do *headway*, considerando o intervalo de tempo baseado na velocidade do veículo seguidor e o comprimento do veículo líder. Com esta pesquisa, o autor concluiu que o UVE diminui com o aumento da velocidade do tráfego, uma vez que este fator é influenciado pelo comprimento dos veículos pesados. Para uma velocidade de congestionamento inferior a 50 km/h, o fator UVE é 1,5, enquanto que para velocidades superiores, varia entre 1,3 e 1,4. A Figura 2.3 representa o caso imaginário em que os pesados teriam o mesmo comprimento do que os veículos ligeiros, provando que a variação do fator UVE com a velocidade de tráfego está relacionada com os diferentes comprimentos entre o dos veículos pesados e o dos veículos ligeiros.

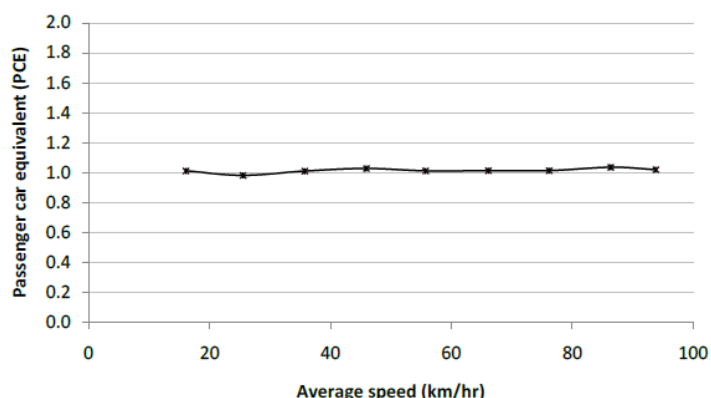


Figura 2.3 – Caso imaginário para o fator UVE quando os comprimentos dos veículos pesados são iguais ao comprimento dos veículos leves (Al-Obaedi, 2016)

2.2.4 Considerações Finais

Com o objetivo de comparar os resultados obtidos pelos diferentes estudos anteriormente apresentados, o Quadro 2.10 mostra os valores do fator UVE, obtidos em diferentes estudos, através do método baseado na comparação dos fluxos e considerando uma relação volume/capacidade entre 70 e 80%.

À semelhança do HCM 2010 verifica-se que, os diferentes autores apontam para um aumento do valor de UVE à medida que aumenta a inclinação e o comprimento da rampa, e diminui a percentagem de veículos pesados. Contudo, para uma determinada inclinação e nível de serviço, o valor do UVE diminui com o aumento da percentagem de veículos pesados.

Relativamente ao método baseado na comparação de velocidades, obtiveram-se valores entre 3,00 (para 5% de pesados) e 3,55 (para 25% de pesados) para o UVE, para um aumento da percentagem de veículos pesados. O mesmo acontece com o método baseado na comparação do *headway*, apesar dos valores não serem tão elevados, pois varia de 1,50 (para 3% de pesados) a 1,78 (para 9% de pesados). Estes valores são contraditórios aos do método baseado na comparação dos fluxos uma vez que, a maior parte dos autores concluiu que o UVE diminui com o aumento da percentagem de veículos pesados.

Quadro 2.10 – Comparação dos valores obtidos nos diferentes estudos apresentados, através do método baseado na comparação dos fluxos

Inclinação (%)	Extensão (km)	% pesados	HCM (2010)	Giuffré et al. (2015)	Al-Kaisy e Rakha (2005)	Ingle (2004)	Cunha e Setti (2011)	
< 2	1	10	1,50	1,80	2,40	-	2,00	
		20	1,50	1,70	2,50	-	2,00	
		30	1,50	1,60	-	-	2,00	
	2	10	1,50	1,80	2,40	-	2,00	
		20	1,50	1,70	2,50	-	2,00	
		30	1,50	1,60	-	-	2,00	
> 3	1	10	1,50	1,70	3,60	2,50	3,50	
		20	1,50	1,70	3,10	2,00	3,00	
		30	-	1,60	-	2,00	3,00	
	3	10	2,00	1,90	3,50	-	5,00	
		20	2,00	1,70	3,20	-	4,00	
		30	-	1,70	-	-	3,50	
	5	10	2,00	1,90	3,50	-	5,00	
		20	2,00	1,80	3,20	-	4,00	
		30	-	1,70	-	-	3,50	
	> 5	1	10	3,00	2,00	4,70	3,50	5,50
			20	3,00	1,70	3,80	3,00	4,00
			30	-	1,60	-	2,50	3,50
3		10	3,50	2,00	5,40	-	7,00	
		20	3,50	1,80	3,70	-	5,00	
		30	-	1,80	-	-	4,00	
5		10	3,50	2,00	5,40	-	7,00	
		20	3,50	1,80	3,70	-	5,00	
		30	-	1,80	-	-	4,00	

Krammes e Crowley (1986) sugere que o método baseado na comparação de velocidades não deve ser a base para a equivalência, mas sim a densidade que o mesmo condutor sente em termos de proximidade a outros veículos e de liberdade de manobra.

Após uma análise da literatura apresentada anteriormente, conclui-se que o método baseado na comparação dos fluxos, para além de ser o mais usado para o efeito, é o mais indicado para a estimativa dos fatores de equivalência.

2.3 Modelos de Microsimulação

A estimativa do UVE pode ser baseada em observações reais ou em simulações. Na aplicação dos métodos anteriormente apresentados, torna-se necessário conhecer os resultados das simulações, em termos de indicadores de desempenho, relativos ao nível da corrente de tráfego simples, constituída por veículos ligeiros apenas e da corrente de tráfego mista.

Esta dissertação baseia-se na aplicação de microsimulação, pelo que é relevante perceber as características, potencialidade e limitações destes modelos. São ainda apresentados alguns resultados da aplicação da microsimulação, assim como definidas as variáveis e os cenários estudados.

2.3.1 Enquadramento e Caracterização geral

Face ao aumento do tráfego nas redes rodoviárias, justifica-se cada vez mais o desenvolvimento de estudos de transportes que permitam melhorar a eficiência operacional das redes existentes. Os modelos de simulação permitem captar os efeitos interativos de diferentes componentes do sistema e da variabilidade da procura de tráfego no tempo (Xiao *et al.*, 2005). A simulação afigura-se por isso como uma ferramenta capaz de apoiar a avaliação do desempenho de uma rede existente ao mesmo tempo que permite inferir os efeitos associados a propostas de alterações a impor ao funcionamento da rede rodoviária (Anu Maria, 1997).

Segundo Law e Kelton (1991), os modelos matemáticos de simulação podem ser classificados em: (i) estáticos ou dinâmicos; (ii) determinístico ou estocástico; (iii) discretos ou contínuos. Os modelos estáticos têm como objetivo representar um sistema num dado instante ou quando não leva em conta a variável tempo, enquanto que os modelos dinâmicos representam as alterações do sistema ao longo do tempo. Os modelos determinísticos não usam formulações com variáveis aleatórias, enquanto que os modelos estocásticos usam uma ou mais. Os modelos discretos usam incrementos na contagem do tempo de simulação, onde apenas é possível determinar os valores das variáveis de estado nos instantes de atualização da contagem, enquanto que nos modelos contínuos, a contagem do tempo é contínua, permitindo determinar os valores das variáveis de estado a qualquer instante. Tipicamente os modelos são estocásticos e dinâmicos (Anu Maria, 1997).

Segundo Tavares (2016), ao nível de detalhe, os modelos podem ser caracterizados como microscópicos, mesoscópicos e macroscópicos. Nos modelos microscópicos, o movimento de cada veículo individual é inserido numa corrente de tráfego com os seus próprios objetivos,

características e propriedades. É ainda possível detalhar o comportamento de condução através dos modelos sub-microscópicos. Os modelos macroscópicos simulam o fluxo de tráfego, tendo em consideração as características a ele agregadas (velocidade, fluxo e densidade) e as relações entre si. Não modelam interações entre veículos. Os modelos mesoscópicos combinam as propriedades dos modelos de simulação microscópica e macroscópica, sendo um pouco menos consistentes do que os instrumentos dos primeiros mas são melhores noutras análises de tráfego. Estes modelos simulam veículos individuais, mas descrevem as suas atividades e interações baseadas em relações agregadas (macroscópicas). Normalmente, são mais utilizados para avaliações de sistemas de informação de viajantes.

Este trabalho baseia-se na aplicação de modelos de microsimulação, por isso dá-se particular atenção a essa tipologia de modelos. Surgiram na década de 90 e representam a última geração de modelos de tráfego disponíveis para desenvolver e avaliar uma ampla gama de estudos de gestão do tráfego rodoviário, de sistemas de controlo, e útil para prever futuras condições de condução (Mauro *et al.*, 2014).

Os modelos de microsimulação representam a realidade da rede de infraestruturas, com detalhe elevado, sendo possível controlar as características do tráfego, o comportamento dos condutores, a dinâmica dos veículos e a escolha das rotas (Figueiredo *et al.*, 2014). Devem ser recolhidas informações no campo para calibrar o modelo através de parâmetros de calibração, que estão sujeitos a erros devido às estimativas feitas, afetando a capacidade de previsão dos modelos. A calibração assegura que o modelo representa a realidade de forma precisa e depende da quantidade e qualidade da informação a utilizar.

A microsimulação é uma modelação dinâmica e estocástica dos movimentos dos veículos ao longo dos elementos da rede, representados em fração de segundo, de acordo com as suas características físicas, as regras do movimento e as regras do comportamento do condutor. Nestas simulações, a dinâmica de cada veículo é representada através do comportamento do tipo seguimento (*car-following*), mudança de via (*lane-changing*) e de aceitação do intervalo crítico (*gap acceptance*).

Hoje em dia existem diversos *softwares* de modelos de microsimulação, de entre os quais se destacam: VISSIM, Paramics, CORSIM e AIMSUN. Neste trabalho, optou-se por utilizar o modelo AIMSUN, por estar disponível no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.

O software AIMSUN, fornece um grande número de indicadores de desempenho (fluxos de tráfego, atrasos, tempos de viagem, etc.), é possível apresentar resultados da rede global ou parcial pretendida (Figueiredo *et al.*, 2014).

2.3.2 A importância do processo de calibração

Durante o desenvolvimento de um modelo, é necessário assegurar que este está a representar o funcionamento real da rede, não só no cálculo dos indicadores de desempenho mas também dos percursos selecionados entre as rotas escolhidas pelos condutores, sendo este o objetivo da calibração. Posteriormente, o modelo calibrado deve ser sujeito a validação. Esta consiste em garantir que o modelo representa a realidade em circunstâncias ou locais diferenciados dos que serviram de base aos trabalhos de calibração. Para o efeito, são comparados e definidos níveis de erro aceitáveis, para os resultados simulados pelo sistema comparativamente aos reais observados (Tavares, 2016). Segundo o autor, pode-se afirmar que a calibração e posterior validação de um modelo é um processo iterativo com reanálises sucessivas desde o início da sua construção até à validação final. Os testes efetuados nestas fases consistem em comparar os resultados produzidos pelo modelo com os observados no sistema real.

É importante fixar critérios universais para os parâmetros de calibração/validação para afirmar que um modelo está apto para aplicação, que conduz a um bom nível de exatidão e que tem uma grande dependência do objetivo e dos recursos disponíveis (Tavares, 2016).

Figueiredo *et al.* (2014) analisaram a influência da introdução de erros controlados em parâmetros de entrada relevantes para o processo de calibração. Inicialmente, foi introduzido um erro no tempo de reação, verificando-se que, para um erro de entrada de +20%, se obtem um erro de saída de +7%, enquanto que para um erro de entrada negativo, há um erro de saída menor, tendo-se assim concluído que é preferível ter um erro por defeito, do que por excesso. No segundo caso, foi introduzido um erro no tempo de reação de arranque em cruzamento e verificou que para um erro de entrada de +20%, o erro de saída é cerca de 20% com relações simétricas para erros negativos. A terceira situação foi introduzir um erro na distância mínima entre veículos ligeiros onde se concluiu que o erro de saída (8% e -10%) é aproximadamente metade do erro de entrada (20% e -20%) logo, é preferível ter um erro de entrada por excesso do que por defeito. Por último, introduziu-se um erro no parâmetro aceleração máxima associada aos veículos ligeiros, verificando-se que, com o erro de entrada de +20%, o erro de saída é -5% e com um erro de entrada de -20%, o erro de saída é de 10%, por isso, é preferível ter um erro por excesso do que por defeito. Todos os parâmetros analisados mostraram um impacto significativo na qualidade dos resultados do modelo. Para o tempo de reação e para a

aceleração máxima, os resultados sugeriram padrões polinomiais para a relação entre erros de entrada e saída, enquanto que para o tempo de paragem e a distância mínima entre veículo, os resultados sugeriram padrões lineares.

Também foi feita uma combinação de erros de entrada pelos autores. Inicialmente combinou-se a variação do tempo de reação com o tempo de paragem, uma vez que este último está relacionado com as capacidades psicomotoras dos condutores (Dewar e Olson, 2007; Figueiredo *et al.*, 2014). Concluiu-se que para o intervalo de erro de entrada de -20% e +20%, o efeito da combinação dos erros é semelhante à adição dos efeitos de cada erro, quando considerados individualmente. Noutros casos, combinaram-se os erros de entrada nos parâmetros tempo de reação e distância mínima entre veículos, e os erros de entrada nos parâmetros tempo de reação e aceleração máxima. Foi necessário fazer uma análise recorrendo a uma regressão linear múltipla, mas os resultados foram inconclusivos.

Ainda foi analisado o caso da introdução de um erro de entrada no tempo de reação, considerando diferentes taxas de saturação da rede. Concluiu-se que para baixas taxas de saturação (80/90%), os erros de entrada têm menor impacto, enquanto que, para taxas de saturação maiores (110/120%), os erros de entrada têm maior impacto nos resultados do modelo.

Os autores referem ainda que seria importante estudar os parâmetros de calibração mais importantes, quando aplicados em diferentes tipos de redes e a diferentes taxas de saturação.

2.3.3 Exemplos de Trabalhos científicos baseados em modelos de microsimulação

A bibliografia da especialidade integra um vasto número de trabalhos científicos na área da teoria do tráfego, desenvolvidos com base em técnicas de microsimulação. Por uma questão de limitação da extensão do documento, foi selecionado um número limitado de trabalhos considerados relevantes para o desenvolvimento desta dissertação.

Cunha e Setti (2011) recorreram a um modelo de simulação para obter as curvas densidade/fluxo, uma vez que é difícil obter estes dados empiricamente. Uma vez que, usando um programa de simulação é possível controlar as condições do tráfego (percentagem e características dos veículos pesados, etc) e a geometria da estrada (inclinação e comprimento do troço inclinado, número de vias, etc), os autores recolheram esses dados para calibrar o modelo de simulação, de forma que seja possível representar o comportamento real dos veículos que circulam na autoestrada estudada, no Brasil, tal como as características de desempenho do

tráfego. A simulação do comportamento dos veículos pesados nos troços inclinados foi baseada na aceleração média para predeterminar as gamas das velocidades. Para calibrar o modelo de desempenho dos veículos pesados, foram recolhidas as velocidades de circulação instantâneas ao longo de um segmento da autoestrada, considerando as inclinações com diferentes comprimentos. Foram consideradas quatro classes de veículos pesados: camião leve, camião de classe média, camião pesado e camião muito pesado.

Para gerar todos os dados necessários para a derivação do fator UVE, foram combinados 2340 cenários com os seguintes parâmetros:

1. Número de vias: 2;
2. Velocidade de fluxo em regime livre: 110 km/h e 100 km/h;
3. Extensão do trecho: 0.50 km, 1.25 km e 2.00 km;
4. Inclinação longitudinal: 0%, 2%, 4%, 6% e 8%;
5. Percentagem de veículos pesados: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%;
6. Fluxo de tráfego: 500, 1000, 1400, 2000, 2100, 2200, 2500, 2900, 3100, 3200, 4050, 4400 e 5000 ve/h.

Todos os cenários foram simulados no programa de microsimulação CORSIM, e as curvas densidade/fluxo obtidas (Figura 2.4) mostram que a capacidade para as condições de base (apenas veículos ligeiros) é de cerca de 2100 veic/(h*vía), enquanto que a densidade é menos clara, mas era expectável que fosse cerca de 25 veic/(km*vía). A Figura 2.4 representa a curva para as condições base da corrente de tráfego, com uma velocidade de fluxo livre de 110 km/h e um segmento plano (0% de inclinação) com 0,5 km de extensão. A Figura 2.4 mostra o resultado para uma percentagem de veículos pesados de 30% numa corrente de tráfego mista, com uma inclinação de 4% e um comprimento de 0,5 km. Esta simulação mostra que houve uma redução da capacidade e sugere que a densidade está próxima dos 25 veic/(km*vía).

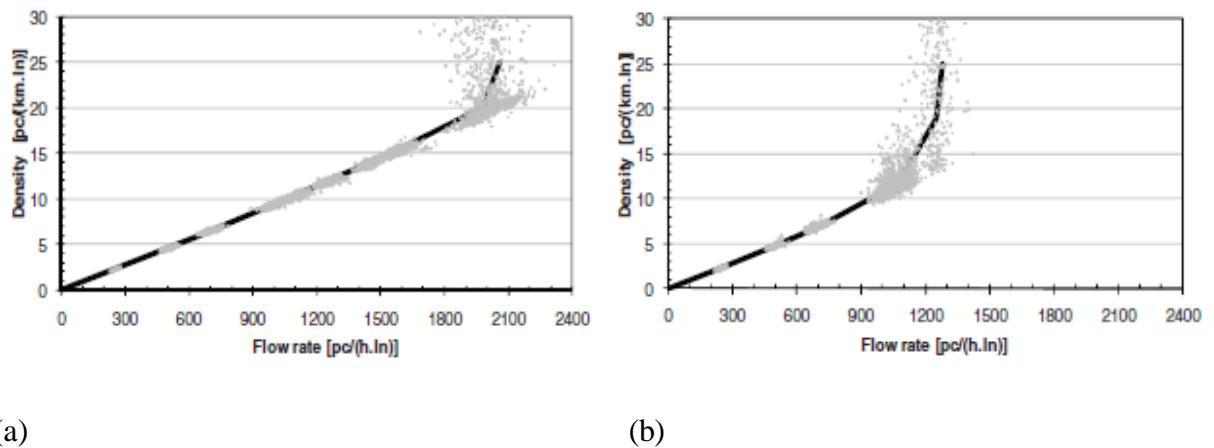


Figura 2.4 – Fluxo de tráfego vs densidade para: (a) uma corrente de tráfego homogênea (veículos leves apenas); (b) uma corrente de tráfego mista (Cunha e Setti, 2011)

Sarvi (2011) desenvolveu um estudo sobre o comportamento dos veículos pesados sob condições saturadas, em duas autoestradas, uma em Tokio e outra em Melbourne. Foi recolhido um fluxo de tráfego sob um nível de serviço variável entre D e F e foi contabilizada a proporção de veículos pesados, assim como a posição, a velocidade e a trajetória de cada veículo, de modo a analisar o espaço entre veículos sucessivos. Os veículos pesados comerciais considerados pelo autor, tinham comprimento superior a 10 metros. Para a simulação do modelo foram consideradas três situações: ligeiro seguindo um ligeiro, ligeiro seguindo um pesado e pesado seguindo um ligeiro. Foi medido o *gap* entre os dois veículos sucessivos, desde o pára-choques traseiro do veículo líder até ao pára-choques dianteiro do veículo seguidor, como é possível visualizar na Figura 2.5. O autor concluiu que os veículos ligeiros circulam mais frequentemente atrás de veículos pesados (em tempo e em espaço) do que atrás de outro tipo de veículo; para velocidades mais elevadas, os veículos (no geral) deixam menos tempo de intervalo mas maior distância entre eles; um ligeiro que segue um pesado deixa um intervalo maior do que em todas as outras situações (28 m), enquanto que o intervalo entre um pesado seguindo um ligeiro (21 m) é maior do que o intervalo entre um ligeiro seguindo outro ligeiro (20 m). Assim, é expectável que a presença dos veículos pesados deverá aumentar o intervalo no fluxo de tráfego, reduzindo a capacidade da via e o rendimento total da seção da autoestrada.

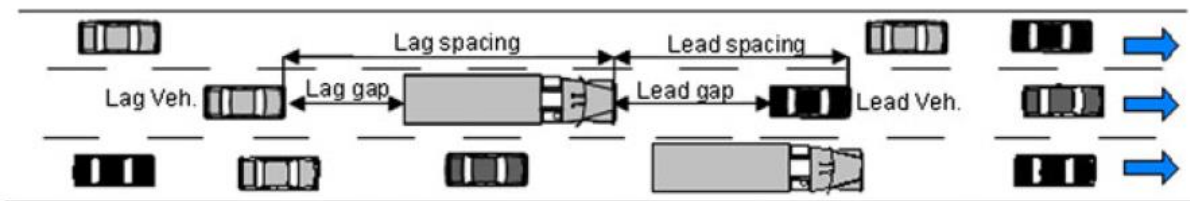


Figura 2.5 – Notação usada para o intervalo espacial entre o veículo seguidor e o veículo líder (Sarvi, 2011)

Também Giuffrè *et al.* (2015) desenvolveram um modelo de simulação para representar o funcionamento de um trecho da autoestrada A22, em Itália. Para recolher os dados necessários, colocaram detetores no tráfego. O troço estudado situa-se em S. Michele (Southbound), numa secção transversal da A22 com duas vias, cada uma com 3,75 metros de largura em cada direção e uma inclinação de 0,09%, com um comprimento de cerca de 2 quilómetros. O trecho selecionado está fora da área de influência de trechos inclinados, com o objetivo de que o tráfego seja contínuo. Com os dados simulados, foi reproduzido o comportamento real do fluxo de tráfego, sendo necessário reajustar os parâmetros de calibração do modelo (velocidade desejada, tempo de reação...), de forma a minimizar a diferença entre os dados observados e os simulados. O objetivo era modelar a influência dos veículos que circulam lentamente na autoestrada, considerando apenas veículos ligeiros. Na Figura 2.6 é possível visualizar a curva velocidade/densidade para os dados empíricos e simulados, para ambas as vias.

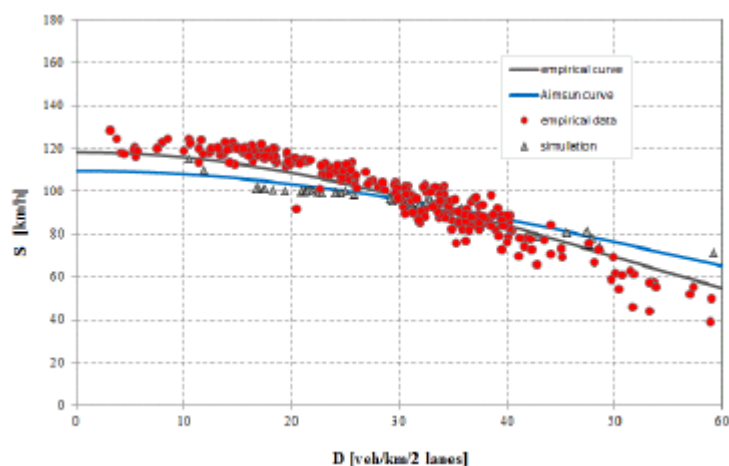


Figura 2.6 – Curva velocidade/densidade com dados empíricos e simulados (Giuffrè *et al.*, 2015)

Para o mesmo troço da A22 em Itália, Mauro *et al.* (2014) tinham também comparado regressões lineares para a relação velocidade/densidade, onde concluiu que houve uma sobreposição substancial das curvas de regressão e que os dados simulados caíram dentro da faixa de confiança da linha de regressão ajustada aos dados empíricos. Os autores verificaram que, se tivessem usado apenas um regime de circulação (regime livre ou regime saturado), não teriam qualquer garantia sobre a capacidade de reprodução de situações reais no modelo.

Para determinar as diferenças significativas do fator UVE para percentagens de veículos pesados, Alecsandru *et al.* (2012) usaram testes estatísticos, efetuando um *teste t* de duas amostras. É de salientar que o *teste t* é um teste de hipótese, para rejeitar ou não uma hipótese nula, usando conceitos estatísticos. Foi feito um modelo de simulação com quatro cenários para a via de restrição: 25%, 50%, 75% e 100% de pesados a circular nessa via, e ainda a situação de não haver via de restrição para qualquer tipo de veículo. Analisaram-se cinco fluxos de tráfego diferentes, correspondentes aos cinco níveis de serviço: A (770 vl/h/via), B (1260), C (1770), D (2150) e E (2400). As percentagens de veículos pesados consideradas foram 10%, 20%, 30% e 40%.

Através do *teste t*, os autores concluíram que a percentagem de pesados tem um efeito significativo no fator UVE, exceto quando essa percentagem excede os 30%. Para os níveis de serviço A e B, o fator UVE varia entre 1,2 e 1,7, cujo valor está próximo do valor obtido pelo HCM (1,5). Também se concluiu que, quando o fluxo de tráfego aumenta e se aproxima da capacidade (nível de serviço E), o UVE varia entre 2,0 e 3,0, cujo valor excede o recomendado pelo HCM 2010, uma vez que este considera um tráfego de fluxo livre.

2.3.4 Considerações finais

A utilização de modelos de microsimulação permite captar os efeitos de diversas componentes do sistema e avaliar a variação da procura de tráfego no tempo. Têm boas vantagens de aplicação, uma vez que permitem estudar diferentes cenários de tráfego e cenários menos comuns, replicando a realidade. Assim, é possível analisar o desempenho de uma rede existente e propor alterações para a melhorar.

Os resultados obtidos através dos modelo de microsimulação são semelhantes aos que foram obtidos anteriormente, uma vez que as tendências e as gamas de valores não diferem muito. Assim, é viável prosseguir com os objetivos deste estudo.

3 DEFINIÇÃO DA METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1 Metodologia geral e objeto do trabalho

O presente trabalho centra-se na determinação de coeficientes de conversão face a diferentes características da estrada e de procura de tráfego. Dada a dificuldade em recolher, por observação, a variação sistemática de um conjunto limitado de variáveis, optou-se por recorrer a técnicas de microsimulação, assentes na aplicação do *software* AIMSUN (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks).

Este trabalho de investigação centra-se na estimação de coeficientes de equivalência de veículos pesados em veículos ligeiros equivalentes, tendo por base diferentes características físicas e condições de circulação, em trechos de autoestrada.

No capítulo anterior ficou patente que os factores UVE (Unidade de Veículo Ligeiro Equivalente) variam com um elevado número de variáveis e fatores. No âmbito do presente estudo pretende-se estimar os fatores de equivalência através do desenvolvimento de relações entre os indicadores de desempenho para a situação de tráfego misto comparativamente a uma frota constituída unicamente por veículos ligeiros.

Uma vez que o método baseado na comparação dos fluxos foi considerado o mais viável, optou-se por utilizá-lo na estimativa dos fatores de equivalência, bem como o método baseado na comparação das velocidades, de modo a verificar se os resultados são contraditórios ou se têm as mesmas tendências e gamas de valores.

A fim de evitar perturbações na rede principal, recorre-se a vias de aceleração para o tráfego secundário se possa inserir nela. Pretende-se analisar a inserção de uma via de aceleração no trecho de autoestrada em estudo, de modo a perceber as alterações que ocorrem, a nível do efeito dos veículos pesados.

3.2 Construção do modelo

O grande objetivo deste estudo é avaliar o efeito dos veículos pesados ao nível da infraestrutura rodoviária. Para tal, é necessário considerar algumas características de tráfego e geométricas

relevantes, para ser possível comparar a situação de tráfego misto com a de tráfego homogêneo (veículos leves apenas), através de indicadores de desempenho. Assim, procedeu-se à construção de um modelo microscópico, de modo a representar geometricamente e funcionalmente um trecho de autoestrada, onde se analisou o efeito associado a vários cenários, para avaliar o efeito dos veículos pesados.

Para construir um modelo no AIMSUN, inicialmente foi necessário codificar a rede de infraestrutura, incluindo as suas características geométricas prevaescentes, designadamente, a extensão de cada trecho, o número de vias, velocidade máxima, entre outros, que serão apresentados de seguida.

3.2.1 Características geométricas da infraestrutura

Tendo por base os objetivos do estudo, procedeu-se à codificação de um segmento básico de autoestrada com 6 km e com duas vias de 3,75 m de largura cada uma, por faixa. Adotou-se uma inclinação longitudinal de 0,5%, de modo a garantir as condições de fluxo livre. Apenas foi considerado um trecho com um sentido de circulação, uma vez que a existência de separador central elimina a possibilidade de interação entre correntes de tráfego em sentido contrário.

A Figura 3.1 representa o perfil longitudinal no trecho em estudo, mostrando as características usadas para simular os vários cenários, com a variação da inclinação e da extensão do trecho inclinado. Apenas se fez variar a inclinação no trecho do meio, tendo os outros dois a inclinação padrão de 0,5%.

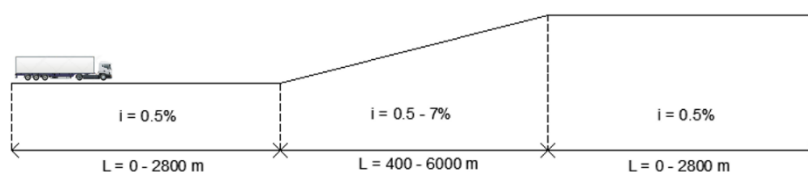


Figura 3.1 - Representação da inclinação e do comprimento do trecho inclinado considerados (adaptado de Cunha e Setti, 2011)

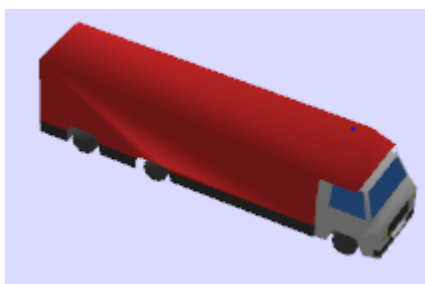
3.2.2 Características dos veículos

À semelhança de Giuffrè *et al.* (2015), neste estudo foi considerada uma mistura de veículos pesados, que inclui camiões simples, camiões-reboque e autocarros, utilizando-se uma representação da média, e adoptando-se um comprimento máximo de 12 metros.

Em relação à velocidade máxima desejada, esta foi considerada igual a 80km/h, com um valor mínimo de 70 km/h e um valor máximo de 90 km/h. Adotou-se um valor de 1 m/s² para a aceleração máxima, variando entre o valor mínimo de 0.8 m/s² e o valor máximo de 1.8 m/s², e um valor de 5 m/s² para a desaceleração máxima, variando entre um mínimo de 4 m/s² e um máximo de 6 m/s². Relativamente a todos os outros valores presentes nas características dos veículos pesados, estes foram considerados iguais aos valores padrão assumidos pelo *software*, onde alguns deles são apresentados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Características gerais do veículo pesado simulado

Comprimento	12 m
Largura	2,50 m
Velocidade máxima desejada	80 km/h
Distância entre veículos	1,50 m
Tempo máximo entre veículos	35 seg
Peso	13608 kg
Peso/Potência	118,6 kg/kW
Peso/Área	610 kg/m ²
Tempo de reação	0,8
Aceleração máxima	1 m/s ²
Desaceleração máxima	5 m/s ²



Para as características dos veículos ligeiros, foi usado um valor mínimo para a velocidade desejada de 85 km/h, e um valor máximo de 180 km/h, pois apesar da velocidade máxima legal

ser de 120 km/h em autoestradas, há sempre condutores que infringem a lei. Para os restantes valores, foram mantidos os valores padrão assumidos pelo *software*.

3.3 Calibração do modelo

Os trabalhos de calibração assentaram na aplicação comparativa dos resultados simulados com os obtidos empiricamente através das expressões de Wu (2002) e May (1990).

Considerando o fluxo de tráfego real, a relação velocidade-densidade é uma função monotonicamente crescente, o que implica uma relação matemática mais simples do que as outras relações (fluxo-densidade e velocidade-fluxo). Além disso, essa relação explica a interação entre os veículos numa corrente de tráfego, onde os utilizadores da mesma têm a percepção do espaçamento entre veículos sucessivos e adaptam a velocidade às condições de maior fluxo (Mauro *et al.*, 2014).

Wu (2002) defende que um tráfego fluido pode ser subdividido em dois grupos: veículos individuais circulando livremente (regime livre) e veículos agrupados que circulam em pelotão (regime condicionado). Considerando um tráfego contínuo e uma igual distribuição de tráfego em todas as vias, é possível expressar a velocidade em regime livre como função da densidade, da velocidade livre, do número de vias e da velocidade desejada, através da seguinte equação:

$$V = V_{FF} - (V_{FF} - V_C) \cdot \left(\frac{D}{D_C} \right)^{N-1} \quad (3.1)$$

Onde, V_{FF} representa a velocidade em regime livre; V_C representa a velocidade média; D representa a densidade; D_C representa a densidade para a capacidade máxima da autoestrada; e N representa o número de vias.

É possível verificar que, a equação torna-se numa relação D-V linear para uma autoestrada de duas vias e numa relação quadrática para três vias (Vasconcelos *et al.*, 2014). Como, no presente estudo, foi considerado um troço de autoestrada com duas vias, a relação é linear.

Foi também abordado o modelo de May, como sendo o melhor modelo para interpretar os dados de campo e a variação de fluxo, especialmente para valores de densidade máxima, em condições de tráfego congestionado (Mauro *et al.*, 2014). De acordo com o modelo de May (May, 1990), e segundo Giuffrè (2015), a relação velocidade-densidade é representada da seguinte forma:

$$V = V_{FF} \cdot \exp \left[-0.5 \cdot \left(\frac{D}{D_c} \right)^2 \right] \quad (3.2)$$

Onde, V_{FF} representa a velocidade de fluxo livre; D representa a densidade; e D_c representa a densidade crítica.

Para a análise de microsimulação, os dados simulados foram obtidos através da aplicação do *software* AIMSUN, para replicar o fluxo numa determinada secção escolhida para o estudo. Tal como foi referido no capítulo anterior, o AIMSUN utiliza informação de entrada como, volume de tráfego, as características do condutor e do veículo, etc. Para esta análise inicial, foram considerados os valores default do *software*, introduzindo valores para a densidade, com o objetivo de se obter os valores da velocidade, como foi feito empiricamente através das expressões de Wu (2002) e May (1990). A simulação foi aplicada a um trecho de autoestrada de duas vias com 1000 m, para um tráfego de veículos ligeiros e para condições de fluxo livre.

Para a densidade, foi introduzida no AIMSUN uma gama de valores entre 0 e 60 veic/h/2vias, tal como foi considerado por Giuffrè *et al.* (2015), de onde se retirou os correspondentes valores da velocidade média na corrente de tráfego, através dos outputs do programa. Para além da velocidade média, foram ainda retirados os valores da densidade, para aplicar nas expressões (3.1) e (3.2). Os dados empíricos e os dados simulados são representados na Figura 3.2.

É de salientar que a velocidade obtida através das simulações no *software* AIMSUN é inferior à velocidade obtida pelos dados empíricos, uma vez que se está a trabalhar com uma distribuição de velocidades e não apenas com o valor médio, como é o caso das expressões de Wu e May. A velocidade máxima considerada foi de 120 km/h, sendo esta a que corresponde à velocidade de fluxo livre.

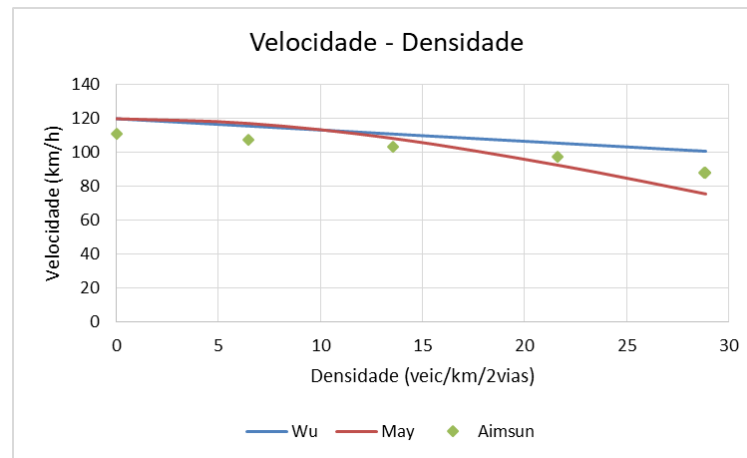


Figura 3.2 – Dados empíricos e dados simulados

Para abordar as questões associadas à calibração e validação, e medir a qualidade de ajuste do modelo, comparou-se os dados empíricos (obtidos através das expressões anteriormente referidas) com os dados simulados, através da fórmula de Geoffrey E. Havers (GEH), usada em casos de microsimulação (Mauro *et al.*, 2014):

$$GEH_i = \sqrt{\frac{2(x_i - y_i)^2}{x_i + y_i}} \quad (3.3)$$

De forma a obter-se uma ordem de grandeza para o parâmetro do GEH, se o valor deste for igual ou inferior a 5 em 85% dos casos, o modelo é aceite. Uma vez que se trata de uma rede pequena, com um troço de 1 km de extensão, obteve-se um valor de 0,28 para o GEH, sendo aceite o modelo usado.

Assim, verificou-se que não é necessário proceder à variação dos parâmetros de calibração mais relevantes para ajustar os dados empíricos e os dados simulados, uma vez que o índice GEH se encontra dentro do intervalo de confiança.

3.4 Variáveis Consideradas

Neste trabalho, foi estudada a influência de várias características de tráfego e geométricas do trecho de autoestrada, que se encontram descritas no Quadro 3.2, para, posteriormente, avaliar o efeito dos veículos pesados.

Para avaliar todas as variáveis descritas, foi necessário combiná-las, fazendo variar cada uma delas de forma isolada, mantendo fixos os valores default para todas as outras.

Quadro 3.2 – Características de tráfego e geométricas consideradas para a análise

Variável	Valor padrão	Intervalo de variação
Inclinação do trecho	0.5 %	[0.5 – 7] %
Extensão do trecho	6000 m	[400 – 6000] m
Porcentagem de pesados	10 %	[0 – 40] %
Fluxo	1000/1200 veic/h/via	[1800 – 4680] veic/h/via
V/C	60 %	[50 – 130] %
Número de vias	2	[2 – 3]
Velocidade	120 km/h	[60 – 120] km/h

Para as características da infraestrutura, dos veículos (leigos e pesados) e dos respectivos condutores, foram assumidos os valores padrão do *software*.

As simulações iniciam-se com a rede vazia. Para cada uma delas, introduz-se o fluxo e a porcentagem de veículos pesados, e ao correr o programa, os veículos entram na rede através dos centróides.

As simulações foram feitas durante um período de 75 minutos, retirando-se os primeiros 15 minutos da simulação, uma vez que a simulação se inicia com a rede vazia, o que influencia os resultados obtidos. Assim, tiram-se os resultados para uma duração de 60 minutos. Dos outputs do *software* foram analisados os valores médios da densidade, fluxo, atraso, etc., e também por intervalos de 15 em 15 minutos. Cada cenário foi replicado 10 vezes, e os dados necessários para a estimativa do fator UVE foram retirados através do output que contém a média das 10 réplicas simuladas.

3.5 Métodos utilizados

Com os dados simulados no modelo estudado, desenvolveram-se relações entre as variáveis do tráfego, com o objetivo de calcular o número de veículos leigos equivalentes para veículos pesados, comparando um fluxo de tráfego de veículos leigos apenas com um fluxo de tráfego misto, considerando diferentes porcentagens de veículos pesados.

Para estimar os valores do fator UVE, foram usados os seguintes métodos:

- Método baseado na comparação dos fluxos;
- Método baseado na comparação da velocidade.

Para todos os métodos usados, o fator de equivalência foi calculado para o mesmo intervalo de tempo (60 minutos), admitindo-se que a qualidade de serviço é a mesma para todas as vias.

3.5.1 Método baseado na comparação dos fluxos

À semelhança de Giuffré (2015) e Huber (1982), inicialmente os valores de UVE foram estimados através do método de igualdade de fluxos, que consiste nas seguintes etapas:

- criar uma curva $Q = Q(D)$ (relação densidade-fluxo) simulando um tráfego de veículos ligeiros apenas, denominada por curva base desde as condições de fluxo livre até à densidade crítica;
- gerar outra curva densidade-fluxo com um tráfego misto (veículos ligeiros e veículos pesados), designada por curva mista;
- podem ser desenvolvidas novas funções densidade-fluxo com diversas percentagens de veículos pesados; as matrizes O/D devem ser atribuídas para reproduzir uma vasta gama de condições de estrada, desde o fluxo livre até à densidade crítica;
- para estimar os valores da unidade de veículos equivalentes (E_T), compara-se o fluxo de tráfego de veículos ligeiros apenas (Q_B) com o fluxo de tráfego misto (Q_M) com a respetiva percentagem de veículos pesados (P_t). A estimativa deve ser feita através da seguinte expressão:

$$E_t = \frac{1}{P_t} \cdot \left(\frac{Q_B}{Q_M} - 1 \right) + 1 \quad (3.4)$$

- podem ser desenvolvidas funções $Q = Q(D)$ para diferentes percentagens de veículos pesados (5%, 10%, 20%, 30% e 40%).

3.5.2 Método baseado na comparação das velocidades

Por último, foi usado o método baseado nas velocidades, desenvolvido por Chandra *et al.* (1994), onde consideraram a diferença entre a velocidade de um tráfego misto e a velocidade de um tráfego homogêneo de veículos ligeiros, através da seguinte expressão:

$$UVE = \frac{V_c / V_i}{A_c / A_i} \quad (3.5)$$

Onde, V_c representa a velocidade média de uma corrente mista, V_i representa a velocidade média causado por uma corrente com veículos ligeiros apenas, A_c representa a área de um veículo ligeiro e A_i a área de um veículo pesado.

Segundo o autores, o tamanho físico de um veículo indica a sua manobrabilidade e a relação peso/potência, a sua capacidade de aceleração e as suas características operacionais, daí se utilizar a área dos veículos para estimar o fator UVE. A área considerada para o veículo ligeiro foi 4x2m, ou seja, 8 m² enquanto que a área considerada para o veículo pesado foi 12x2,5m, ou seja, 30 m². Estas áreas foram obtidas através das características dos veículos usadas no *software* AIMSUN.

3.6 Via de Aceleração

Para minimizar a perturbação da corrente principal, os veículos secundários inserem-se nela através de vias de aceleração, de modo a atingirem a velocidade da corrente prioritária, sendo a sua utilização tanto mais importante quanto maior for a velocidade de base e os volumes de tráfego da corrente principal (CCDR-N, 2008). Estas vias justificam-se em estradas do tipo 2x2 vias, que é o caso do trecho de autoestrada em estudo.

De acordo com a norma JAE P5/90, sempre que se opte pela aplicação de vias de aceleração, estas devem ser do tipo paralelo e ter uma largura de 3,5 metros. Essas características foram aplicadas no modelo, tendo sido colocadas vias de aceleração no início do trecho (a 0 m), a meio (a 3000 m) e no fim (a 6000 m), de modo a avaliar o efeito desta perturbação no tráfego, estimando os valores UVE.

O comprimento destas vias é definido em função da velocidade de base, também pela norma JAE P5/90, sendo apresentados no Quadro 3.3 os valores da extensão total das vias de aceleração.

Quadro 3.3 – Extensão total das vias de aceleração (JAE P5/90)

Velocidade de projeto (km/h)	60	80	90	100	>100
Extensão Total (m)	140	180	210	240	270

O valor adotado para a extensão da via de aceleração foi de 300 metros, uma vez que a velocidade de projeto é de 120 km/h.

O objetivo é comparar a situação de existência de uma via de aceleração, nas três localizações mencionadas, para o aumento do volume de tráfego, mantendo os valores do fluxo aplicados na análise da variável relativa ao nível de saturação, que se fez variar de 50 a 130%. Do fluxo total correspondente a cada nível, considerou-se que 10% entrava pela via de aceleração e os restantes 90% pela corrente principal, mantendo a presença de 10% de veículos pesados para ambos.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, em primeiro lugar são apresentadas as informações gerais obtidas através das simulações, a fim de estabelecer as relações entre os parâmetros de fluxo, velocidade e densidade. Posteriormente, são apresentados os resultados obtidos através dos métodos considerados para a estimativa do fator UVE (Unidade de Veículo Ligeiro Equivalente), para as variáveis anteriormente apresentadas, com o objetivo de avaliar a influência dos veículos pesados no desempenho da autoestrada.

4.1 Determinação do fluxo de saturação

Segundo os manuais técnicos (CCRDN, 2008) é expectável que a capacidade de uma via inserida um ambiente urbano, onde se circula a 50 km/h, seja de cerca de 1900 vl/h/via. Contudo e no caso das autoestradas, esse valor tende a aumentar, na medida em que a velocidade desejada é de 120 km/h. Assim e recorrendo à Curva D-V (Figura 4.1), procurou-se identificar qual o valor da densidade que identifica a fronteira a partir da qual o fluxo começou a diminuir, ou seja, a entrada na zona instável. Verificou-se que a densidade crítica foi atingida para uma capacidade de cerca de 5150 vl/h/2vias. Daqui se conclui que a velocidade afeta muito significativamente o fluxo de saturação.

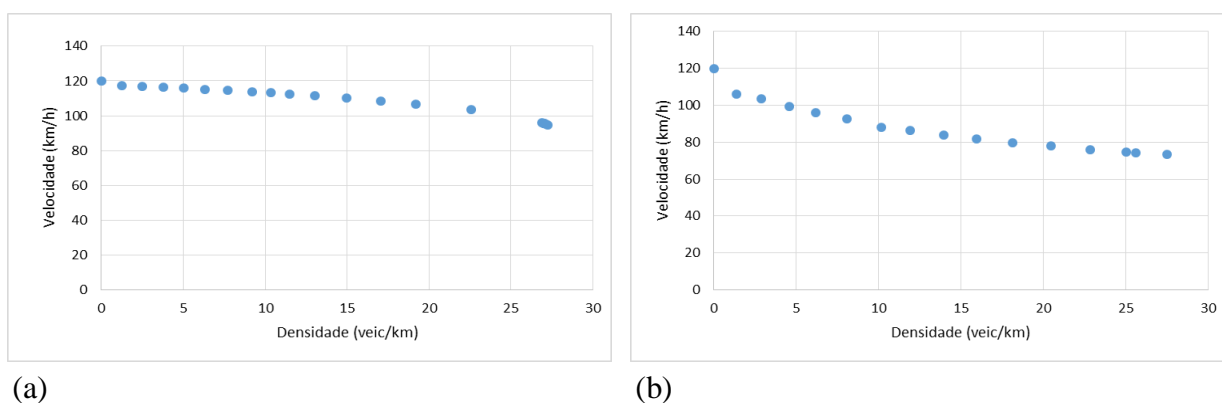


Figura 4.1 – Curvas: (a) Base; (b) Mista

4.2 Estimação e análise das curvas fundamentais do tráfego

Para estimar o fator equivalente para uma determinada percentagem de veículos pesados, foi necessário obter o fluxo, a velocidade e a densidade. Para os métodos referidos, comparou-se o fluxo e a velocidade obtidos, a partir de uma corrente de tráfego constituída unicamente por veículos ligeiros com um tráfego misto, para a mesma densidade. Para tal, foi necessário iniciar as simulações pela relação Volume/Capacidade, para um tráfego homogéneo (veículos ligeiros apenas), que se fez variar entre 50 e 130%. Uma vez que, como foi referido no capítulo anterior, a relação V/C padrão foi de 60%, determinou-se qual o valor da densidade para essa relação, que corresponde a 12 veic/km, como é possível verificar-se no Quadro 4.1. Os valores das densidades foram arredondados à unidade, por excesso.

Quadro 4.1 – Valores da densidade para os níveis de saturação

V/C (%)	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Densidade (veic/km)	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00	22,00	25,00	26,95

4.2.1 Efeito do nível de saturação

Em termos gerais, e tal como seria expectável, as simulações mostraram que o atraso dos veículos ligeiros é maior do que o atraso dos veículos pesados, notando uma grande diferença de valores para maiores níveis de saturação. O mesmo acontece com o tempo total de viagem, mas a diferença não é tão significativa, como se pode verificar na Figura 4.2

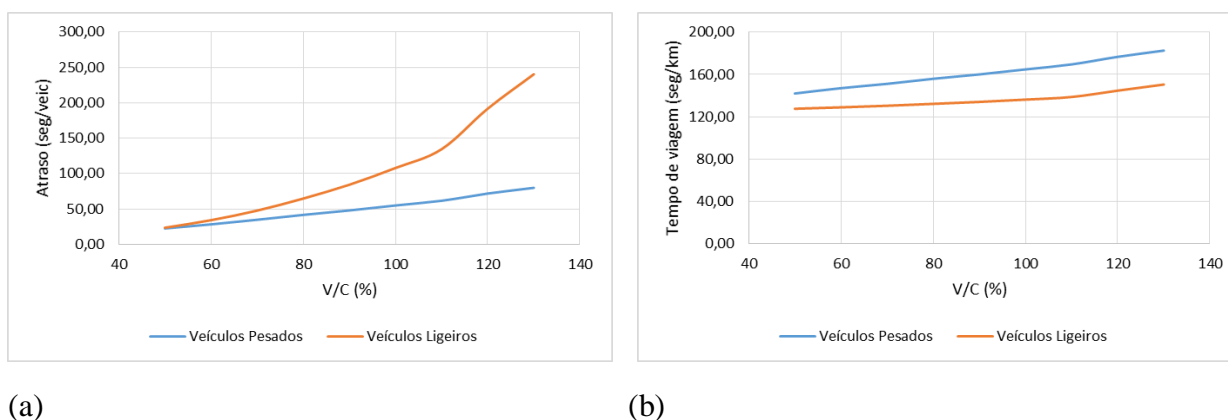


Figura 4.2 – Gráfico com os resultados da comparação de um tráfego simples e de um tráfego misto, com o aumento do nível de saturação, para a variável: (a) Atraso; (b) Tempo de viagem

Uma vez que a percentagem de veículos pesados padrão considerada foi de 10%, o fluxo de veículos ligeiros é superior ao dos veículos pesados, e aumenta com o nível de saturação, ao contrário do que acontece com a velocidade, pois os veículos ligeiros circulam com uma velocidade superior à dos veículos pesados e estas diminuem com o aumento do nível de saturação (Figura 4.3).

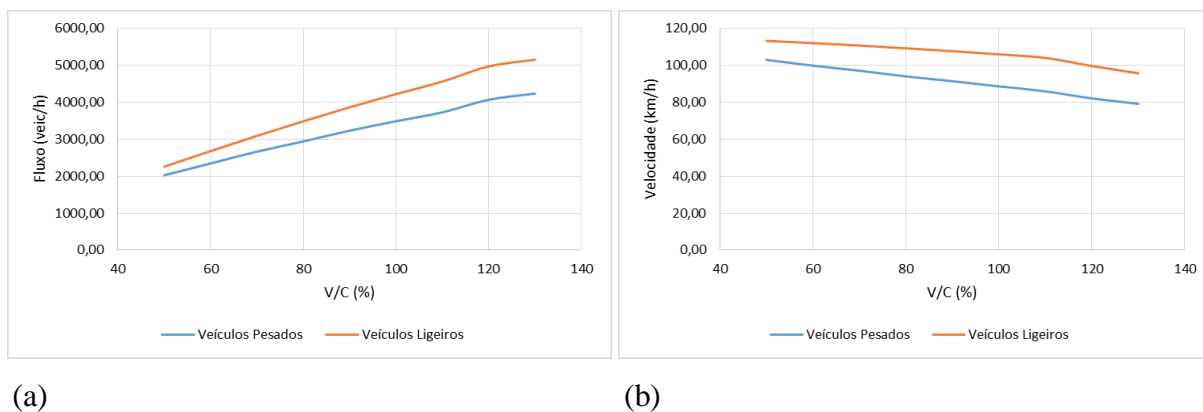


Figura 4.3 - Gráfico com os resultados da comparação de um tráfego simples e de um tráfego misto, com o aumento do nível de saturação, para a variável: (a) Fluxo; (b) Velocidade.

À semelhança de Alecsandru *et al.* (2012), quando o fluxo é baixo, as interações entre os veículos ligeiros e pesados são mínimas logo, os pesados têm um impacto pouco significativo no rendimento geral da estrada.

Ainda relativamente à relação V/C, as simulações mostraram que o *headway* diminui à medida que ela aumenta, sendo 1,78 seg/veic para um V/C de 50% e 0,84 seg/veic para um V/C de 130% (Figura 4.4). Isto deve-se ao facto do fluxo e a densidade estarem a aumentar, logo há menos espaço disponível entre os veículos que circulam na autoestrada. Também se verificou que o *headway* numa corrente de tráfego mista é maior do que numa corrente de tráfego apenas de veículos ligeiros.

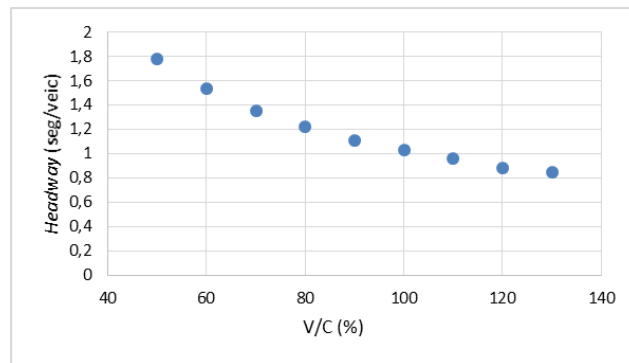


Figura 4.4 – Gráfico com os valores do *headway* para a variação do nível de saturação, para um tráfego misto

4.2.2 Efeito da percentagem de veículos pesados

Uma das principais variáveis consideradas foi a percentagem de veículos pesados. Quando esta aumenta: (1) o atraso dos veículos ligeiros aumenta significativamente; (2) o atraso dos veículos pesados aumenta, mas de forma não muito significativa; (3) o atraso total aumenta; (4) o fluxo diminui; (5) o número de veículos diminui; (6) a velocidade diminui; (7) a distância total de viagem diminui; (8) o tempo de viagem aumenta; (9) e o número de veículos que passam na totalidade dos 6 quilómetros diminui. A presença de veículos pesados no fluxo de tráfego afeta o número de veículos que podem ser servidos (TRB, 2000). A Figura 4.5 representa os resultados para um troço com uma extensão de 6 km e para as diferentes percentagens de veículos pesados consideradas. É de salientar que a distância total de viagem diminui, uma vez que o fluxo também diminui, devido aos veículos pesados ocuparem mais espaço na estrada

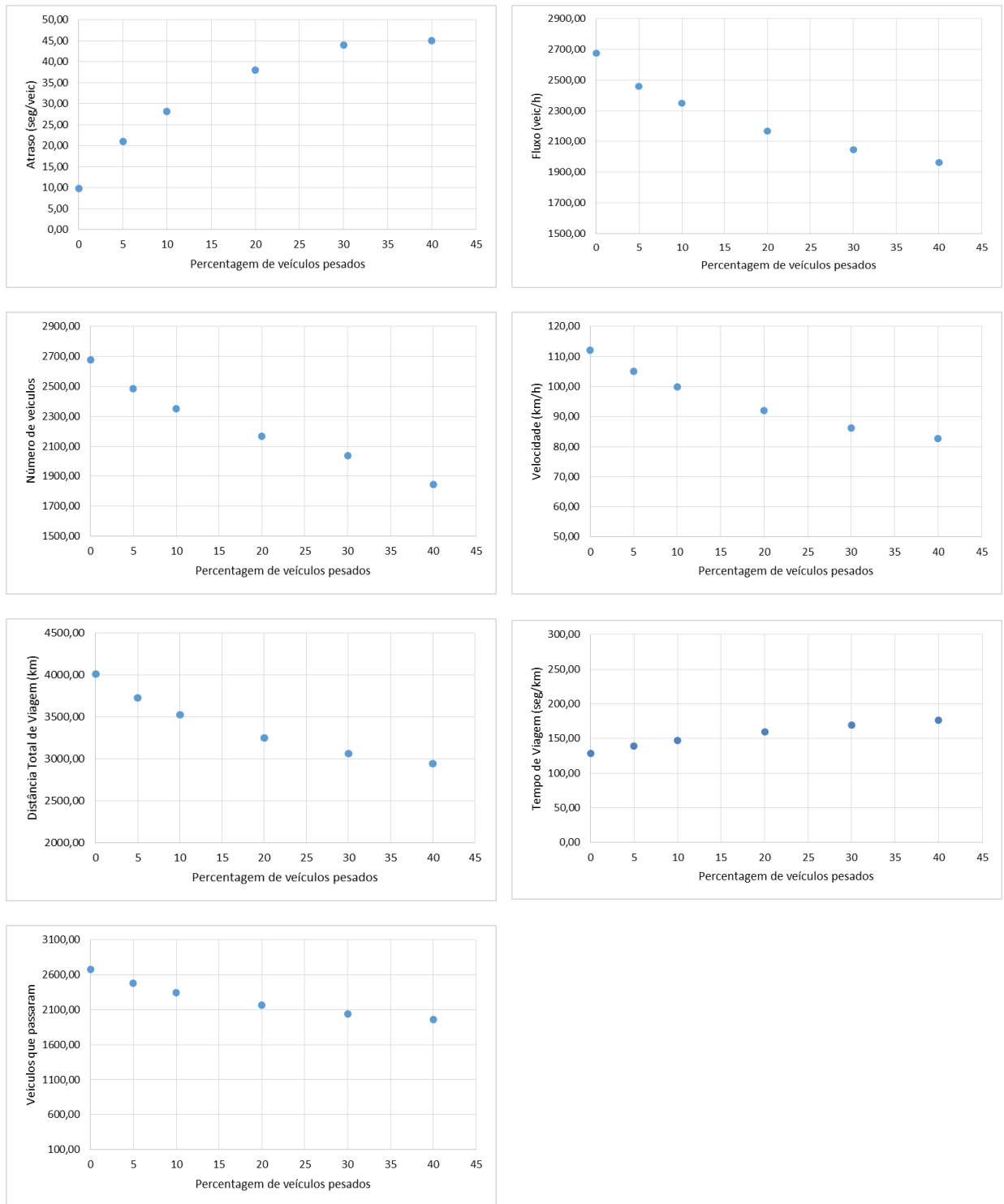


Figura 4.5 – Gráficos com resultados das variáveis estudadas para a variação da percentagem de veículos pesados

À semelhança de Ahmed (2010), neste estudo conclui-se que o *headway* dos veículos ligeiros é menor do que o dos veículos pesados, sendo a diferença entre eles de 0,11 para uma percentagem de veículos pesados de 5% e de 0,50 para uma percentagem de 40%, ou seja, para percentagens baixas de veículos ligeiros, a diferença entre o *headway* de ambos os tipos de veículos, não é significativa, mas para percentagens mais altas já começa a ser. Assim se conclui que o *headway* aumenta com o aumento da percentagem de veículos pesados (Figura 4.6) o que responde ao expectável.

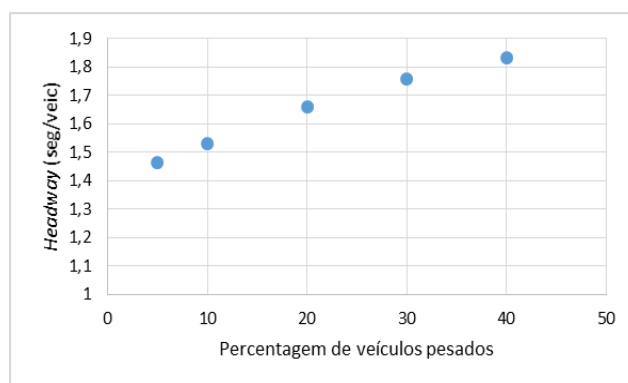


Figura 4.6 - Gráfico com os valores do *headway* à medida que a percentagem de veículos pesados aumenta

4.2.3 Efeito da inclinação longitudinal

Outra variável importante considerada foi a inclinação longitudinal. Foi feita variar entre 1 e 7%, e à medida que aumenta: (1) o atraso aumenta; (2) o fluxo diminui; (3) o número de veículos diminui; (4) a velocidade diminui; (5) o tempo de viagem aumenta; (6) e a distância total de viagem diminui. A Figura 4.7 representa os resultados para um troço com uma extensão de 6 km e para 10% de percentagem de veículos pesados.

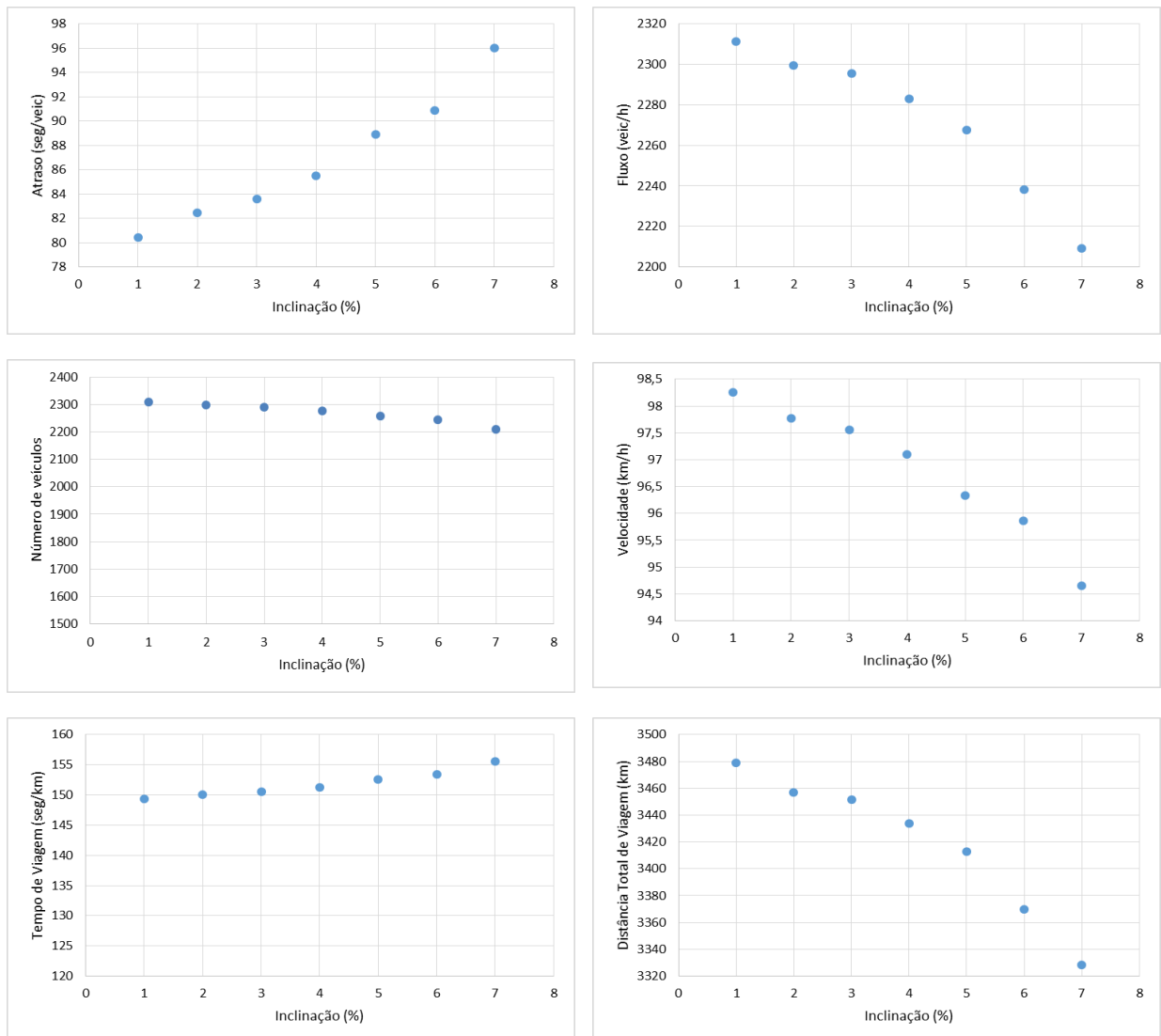


Figura 4.7 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para a variação da inclinação, para um tráfego misto

4.2.4 Efeito do comprimento da rampa

O comprimento do trecho inclinado é outro dos fatores importantes, que influenciam o efeito dos veículos pesados. Através da análise dos resultados obtidos, verificou-se que quando este aumenta: (1) o atraso aumenta; (2) o fluxo diminui; (3) o nº de veículos diminui; (4) a velocidade diminui; (5) a distância total de viagem diminui; (6) o tempo de viagem aumenta. A

Figura 4.8 representa os resultados para 10% de porcentagem de veículos pesados, para 3% de inclinação e para as diferentes extensões do trecho inclinado.

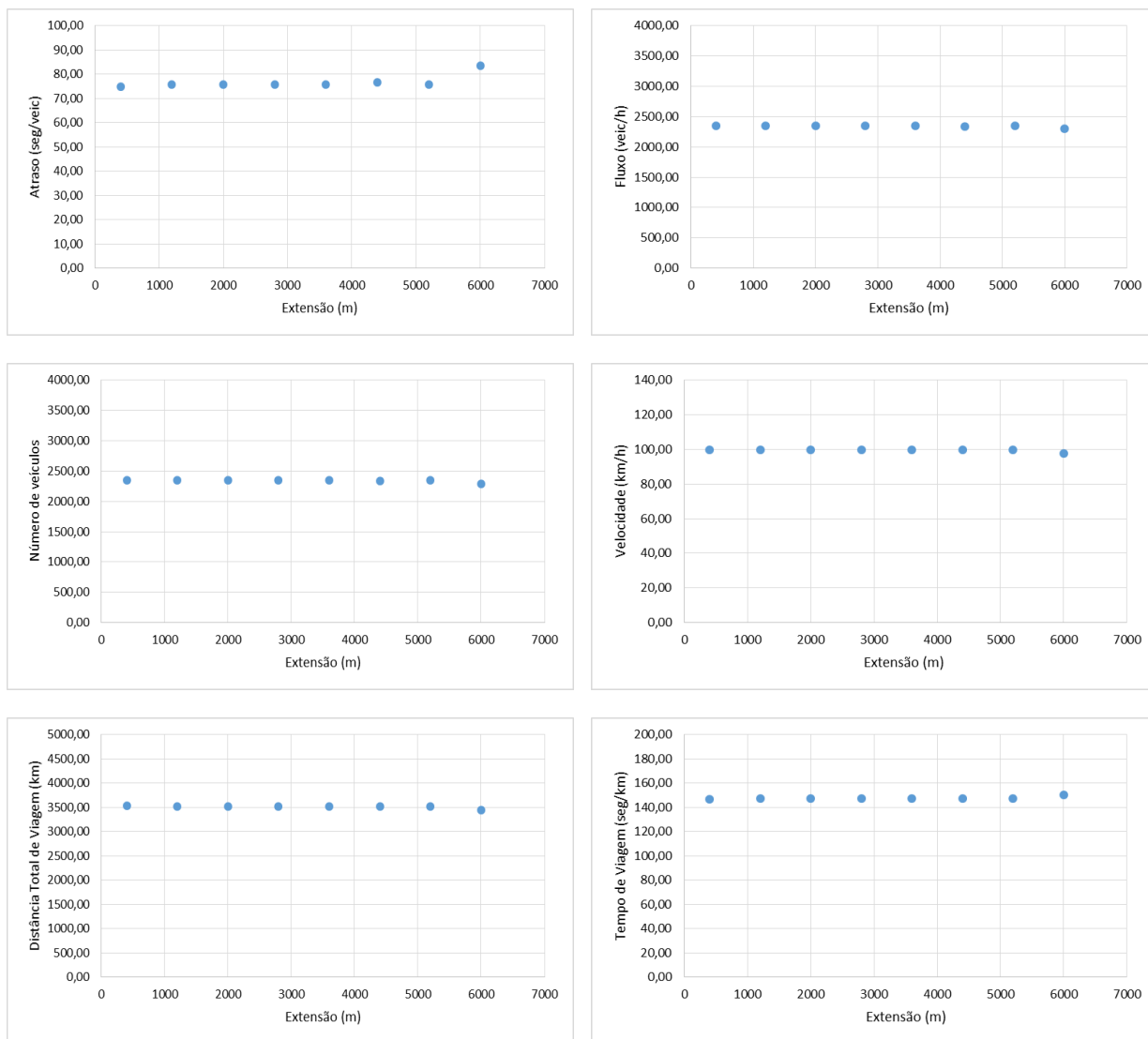


Figura 4.8 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para a variação da extensão, para 3% de inclinação e um tráfego misto

É de salientar que, para uma extensão de 6000 m e para uma inclinação de 7%, mantendo os 10% de pesados, o efeito é muito maior do que para outra qualquer extensão e inclinação do trecho, esperando-se que o fator de equivalência também seja o mais elevado para essas condições. Como seria de esperar, estas rampas de maior inclinação e mais longas resultam

numa redução mais drástica da velocidade, como é possível verificar na Figura 4.9. A inclinação do terreno também reduz a capacidade e o fluxo (TRB, 2000).

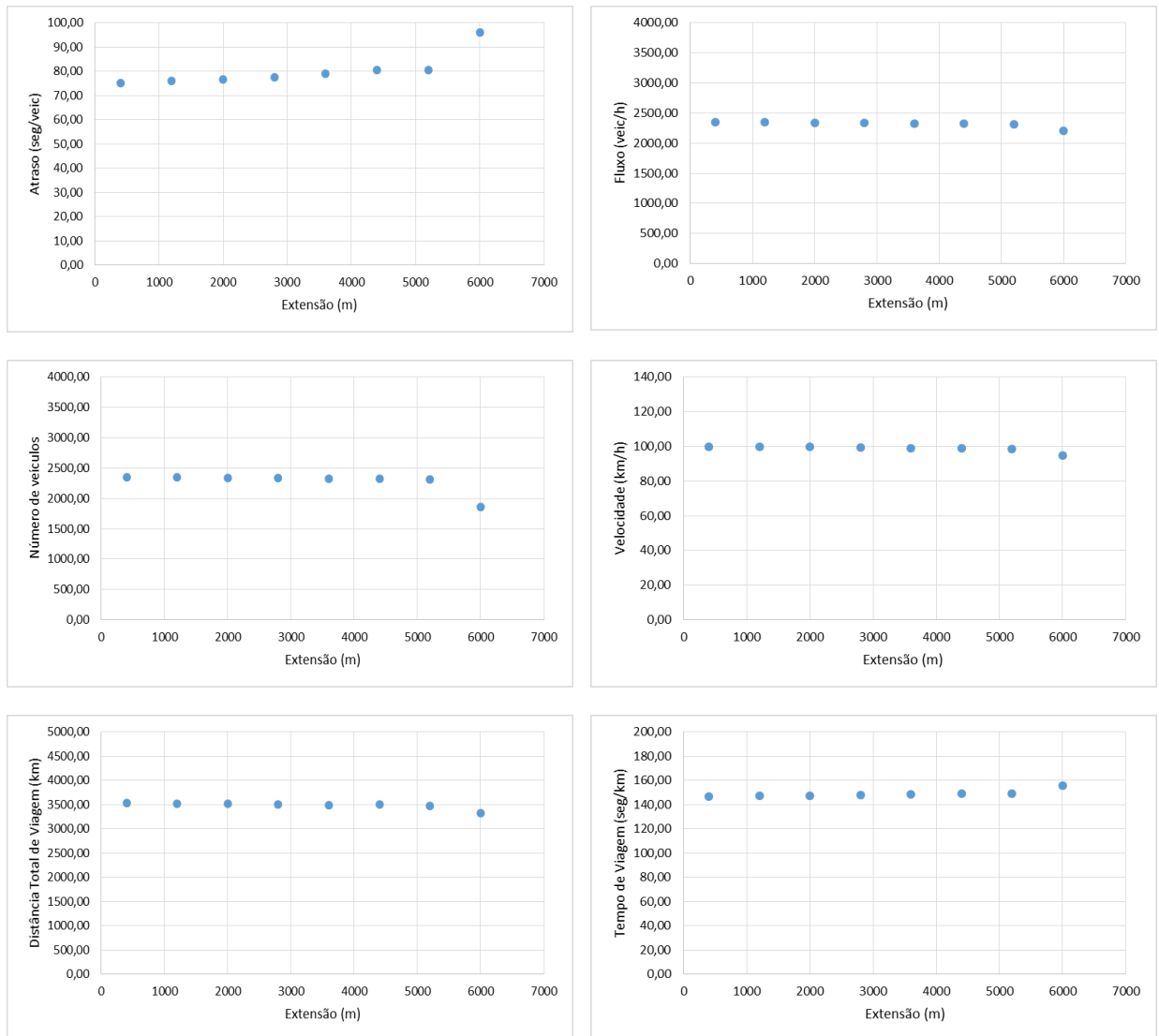


Figura 4.9 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para a variação da extensão, para 7% de inclinação e um tráfego misto

4.2.5 Efeito da velocidade

A velocidade, também foi feita variar, entre 50 e 120 km/h, ou seja, os limites mínimo e máximo de circulação, respectivamente. Quando esta aumenta: (1) o atraso aumenta; (2) o fluxo aumenta; (3) a distância total de viagem aumenta; (4) o tempo de viagem diminui; (5) e o número de veículos aumenta. Estes resultados podem ser verificados na Figura 4.10 e têm em consideração um troço de 6000m e 10% de percentagem de veículos pesados.

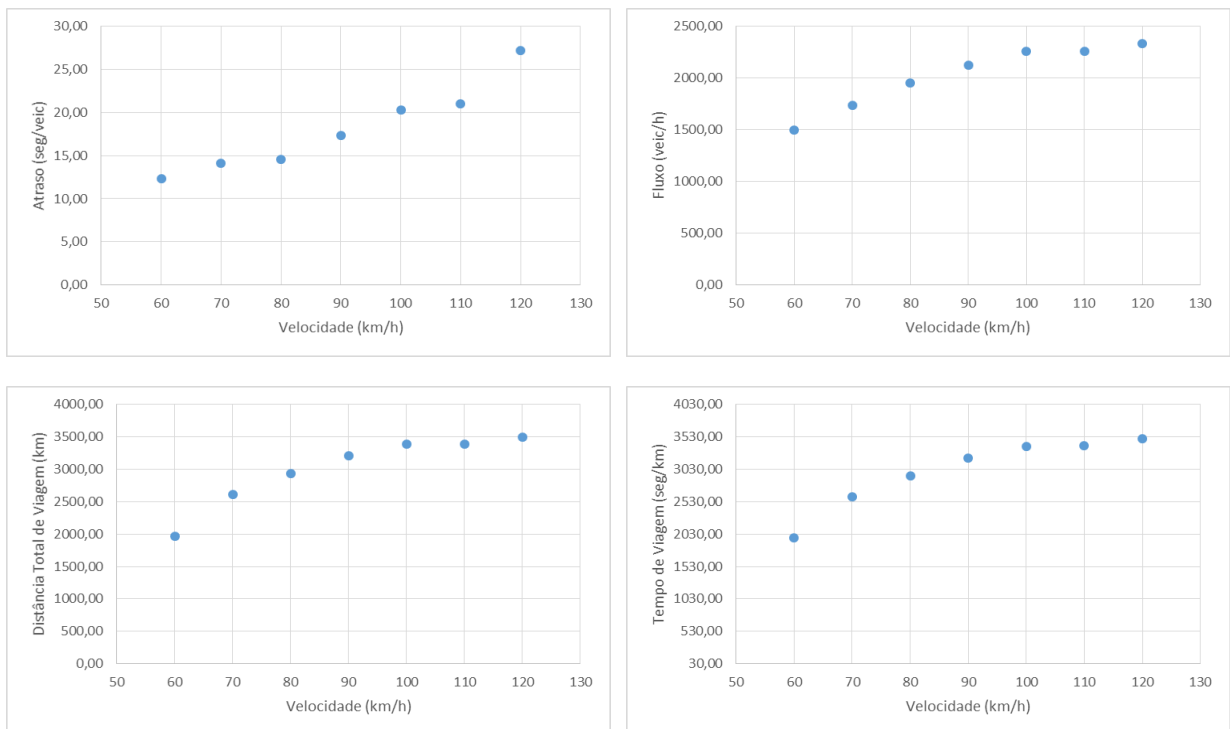


Figura 4.10 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para o aumento da velocidade, para um tráfego misto

À medida que a velocidade aumenta (de 60 para 120 km/h), o fluxo aumenta, uma vez que o tráfego é mais fluido e a velocidade de fluxo livre também é maior. Como o fluxo está diretamente relacionado com o *headway*, à medida que o fluxo aumenta este diminui (para um tráfego misto), como se pode verificar na Figura 4.11.

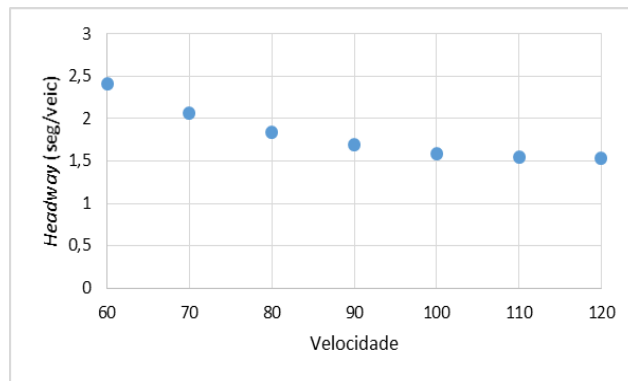


Figura 4.11 - Gráfico com os valores do *headway* de um tráfego misto à medida que a velocidade aumenta

4.2.6 Efeito do número de vias

Relativamente ao número de vias, considerando um total de 3 vias: (1) o atraso diminui; (2) o fluxo aumenta; (3) o número de veículos aumenta; (4) a velocidade aumenta; (5) a distância total de viagem aumenta; (6) o tempo de viagem diminui muito significativamente; (7) e a velocidade aumenta. Uma vez que se aumenta de 2 vias para 3, a capacidade passa de 5150 uvl/h/2vias para 7725 uvl/h/2vias. Como a capacidade aumenta, já seria se esperar o aumento do fluxo e a diminuição do atraso na corrente de tráfego. Mais uma vez, os resultados apresentados na Figura 4.12, são para os valores default de um trecho de 6000 m e um tráfego misto com 10% de veículos pesados.

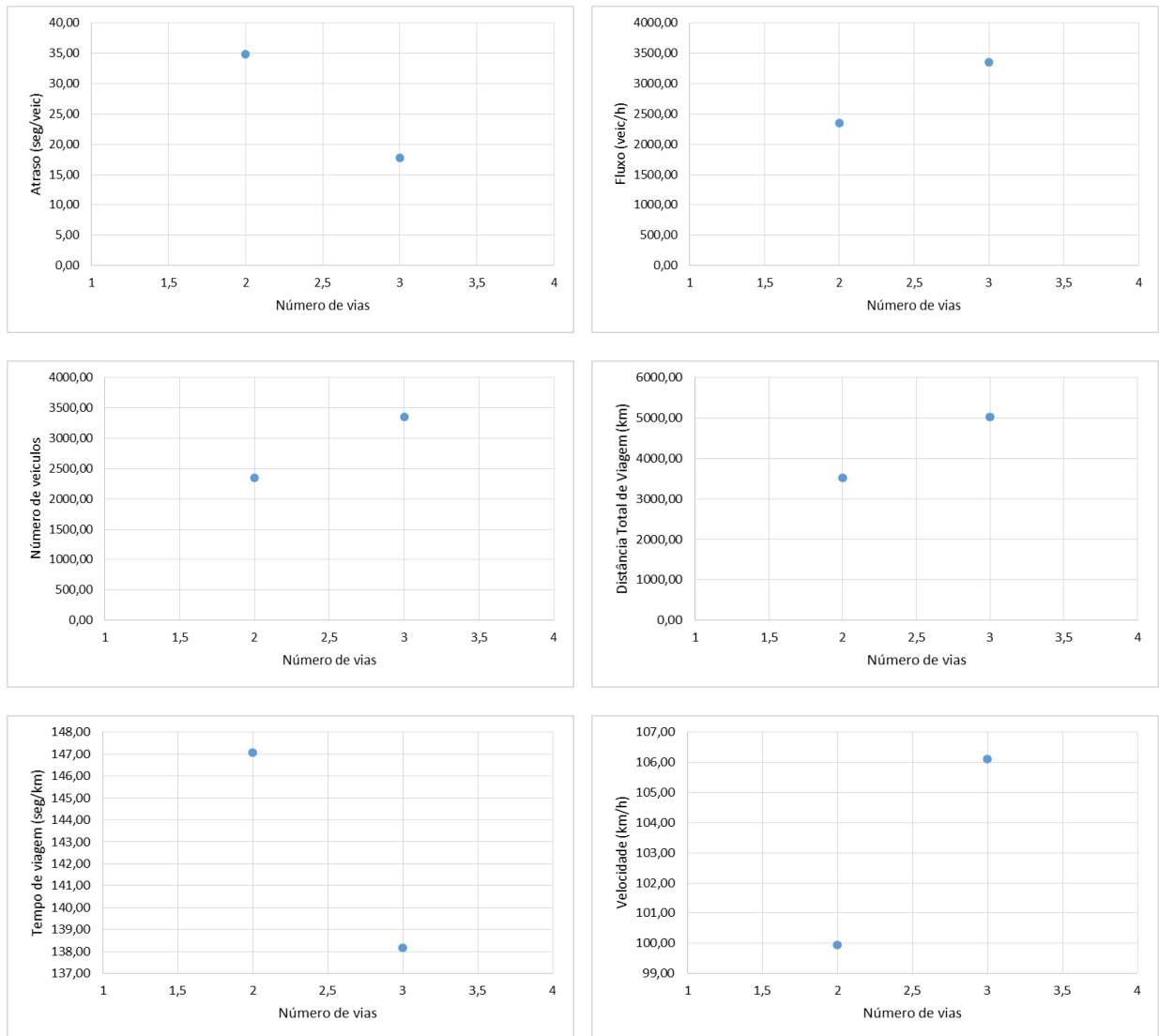


Figura 4.12 - Gráficos com resultados da variáveis estudadas para a variação do número de vias, para um tráfego misto

4.3 Estimação dos fatores de equivalência

Através da comparação dos resultados anteriormente apresentados, para um tráfego misto e para um tráfego homogêneo, foi possível estimar os fatores de equivalência, com o objetivo de avaliar a variação da qualidade do tráfego.

4.3.1 Método baseado na comparação dos fluxos

Foi analisado o efeito das variáveis do tráfego e da geometria da autoestrada, entre veículos leves e veículos pesados, com base na igualdade dos fluxos. Essa metodologia foi usada para estimar os veículos leves equivalentes para veículos pesados, ou seja, o fator UVE.

Avaliação do efeito da percentagem de veículos pesados

Através deste método, concluiu-se que, no geral, o fluxo diminui com o aumento da percentagem de veículos pesados, uma vez que estes ocupam mais espaço na autoestrada, devido às suas dimensões (TRB, 2000).

À semelhança de Linzer *et al.* (1979), os valores do fator UVE que foram estimados, mostram que o efeito dos veículos pesados diminui à medida que a percentagem destes aumenta, pois formam-se pelotões e a interação com os veículos leves é reduzida (St. John e Glauz, 1976). A Figura 4.13 mostra os valores UVE obtidos para percentagens de veículos pesados entre os 5 e os 40%, verificando-se que o UVE atinge um valor de 2,5 para uma percentagem de 5% e um valor de 1,9 para 40% de veículos pesados.

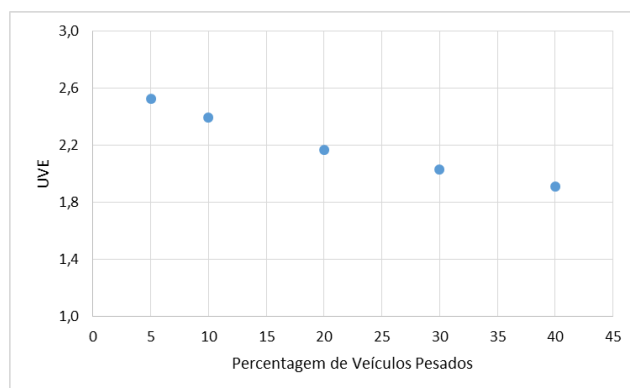


Figura 4.13 – Valores UVE estimados para diferentes percentagens de veículos pesados

Avaliação do efeito do nível de saturação

Para volumes baixos, os veículos têm liberdade para escolher a sua velocidade, e já era de esperar que os veículos pesados tivessem pouco efeito sobre o fluxo de tráfego. Através dos valores de UVE representados na Figura 4.14, concluiu-se que o aumento da relação volume/capacidade, ou seja, o aumento do nível de saturação provoca um aumento no valor do fator UVE. Este apresenta um valor de 2,2 para um V/C de 50% e atinge o valor de 3,2 para um

V/C de 130%. Também Cunha e Setti (2011) obtiveram valores entre 1,1 e 3,9, para os níveis de serviço A e F, respetivamente.

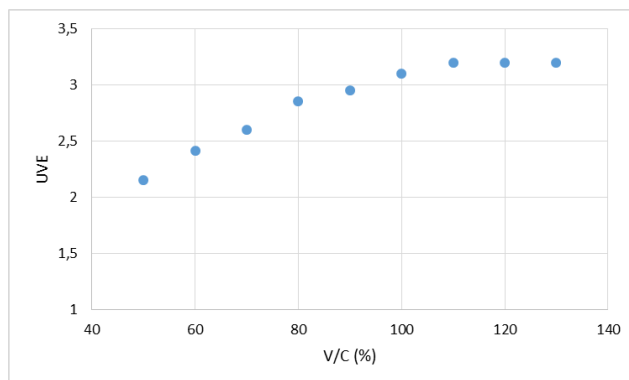


Figura 4.14 - Valores UVE estimados para a variação do nível de saturação

O efeito dos pesados, com o aumento do nível de saturação, aumenta devido a uma maior interação entre os veículos no trânsito misto e à redução de oportunidades de ultrapassar os veículos de marcha lenta (Ahmed, 2010).

Avaliação do efeito da velocidade

Uma vez que a velocidade tem um grande impacto no tráfego, o efeito dos veículos pesados aumenta com o aumento da velocidade, como seria expectável, sendo o UVE igual a 1,2 para 60 km/h e 2,3 para 120 km/h. Esse aumento está representado na Figura 4.15, e deve-se ao aumento do fluxo, uma vez que o método baseado na comparação dos fluxos é aplicável para a mesma densidade.

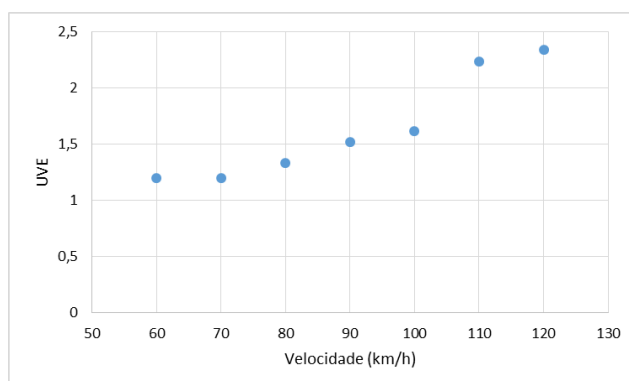


Figura 4.15 - Valores UVE estimados para a variação da velocidade

Os resultados obtidos encontram-se em conformidade com Cunha e Setti (2011), que concluíram que o fator UVE aumenta com o aumento da velocidade de fluxo livre.

Avaliação do efeito da inclinação

No geral, a inclinação do terreno reduz a taxa de fluxo de serviço (TRB, 2000), o que foi comprovado pelas simulações, pois o fluxo diminui à medida que a inclinação aumenta de 1% para 7%.

A Figura 4.16 mostra que o UVE aumenta com o aumento da inclinação, variando entre 2,4 e 2,8 para 1 e 7%, respectivamente. Estes resultados foram obtidos considerando um trecho de 6 km, com 10% de veículos pesados presentes no tráfego.

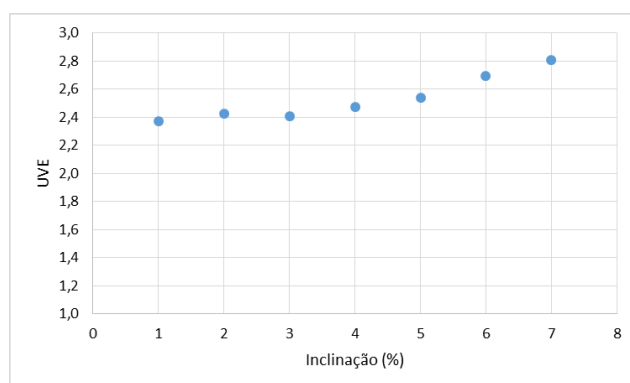


Figura 4.16 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação

Um fator importante que contribui para o efeito de veículos pesados em trechos inclinados é o seu desempenho da aceleração ser inferior ao dos veículos leves (Al-Kaisy e Jung, 2004).

Avaliação do efeito do comprimento da rampa

Segundo Al-Kaisy e Jung (2004), geralmente o UVE aumenta com o aumento do comprimento da rampa. Como expectável, para terrenos planos e inclinações baixas (< 3%), o fator UVE mantém o seu valor de 2,4, e começa a aumentar para inclinações superiores a 3%, atingido o valor de 3,1 para 7% de inclinação, como é mostrado na Figura 4.17. Estes valores foram obtidos para uma extensão de 6000 metros e para 5% de veículos pesados. Para as mesmas condições, o HCM apresenta um UVE igual a 2,5 para inclinações inferiores a 3%, que é

bastante semelhante ao valor obtido neste estudo, e 5,5 para inclinações superiores a 6%, que já é superior aos 3,1 obtidos.

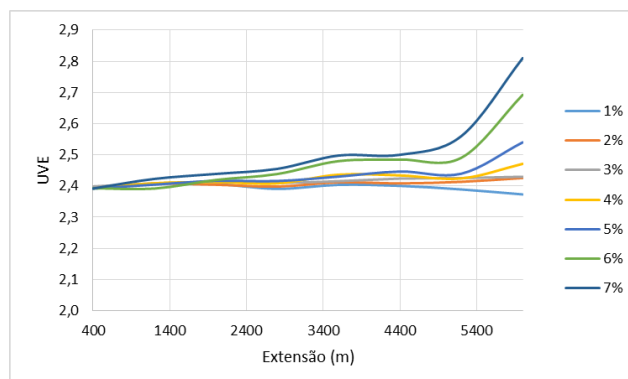


Figura 4.17 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação e extensão do trecho inclinado, para um tráfego com 5% de veículos pesados

Assim, concluiu-se que os veículos pesados têm um maior efeito em trechos mais inclinados e mais extensos, como expectável.

Avaliação do efeito da combinação entre inclinação, extensão e percentagem de veículos pesados

Tal como apresentado no HCM, neste estudo também foi analisada a combinação entre as variáveis inclinação, extensão e percentagem de veículos pesados. Para terrenos planos ou de inclinações baixas (< 3%), era expectável que o UVE aumentasse com o aumento da percentagem de veículos pesados, o que se verificou através dos resultados obtidos, apresentados na Figura 4.18. Concluiu-se que o efeito dos veículos pesados é menor para inclinações baixas, trechos menos extensos e para maiores percentagens de veículos pesados, enquanto que é maior para inclinações elevadas, trechos mais extensos e menores percentagens de veículos pesados. Os resultados obtidos mostram que o fator UVE assume um valor igual a 1,9 para 1% de inclinação e 40% de veículos pesados, e igual a 3,1 para 7% de inclinação e 5% de veículos pesados. Para a primeira situação, o HCM apresenta um fator UVE de 1,5, que é um pouco inferior aos valor obtido neste estudo, e para a segunda situação, o UVE é 7,0, que já é muito superior ao valor obtido (3,1).

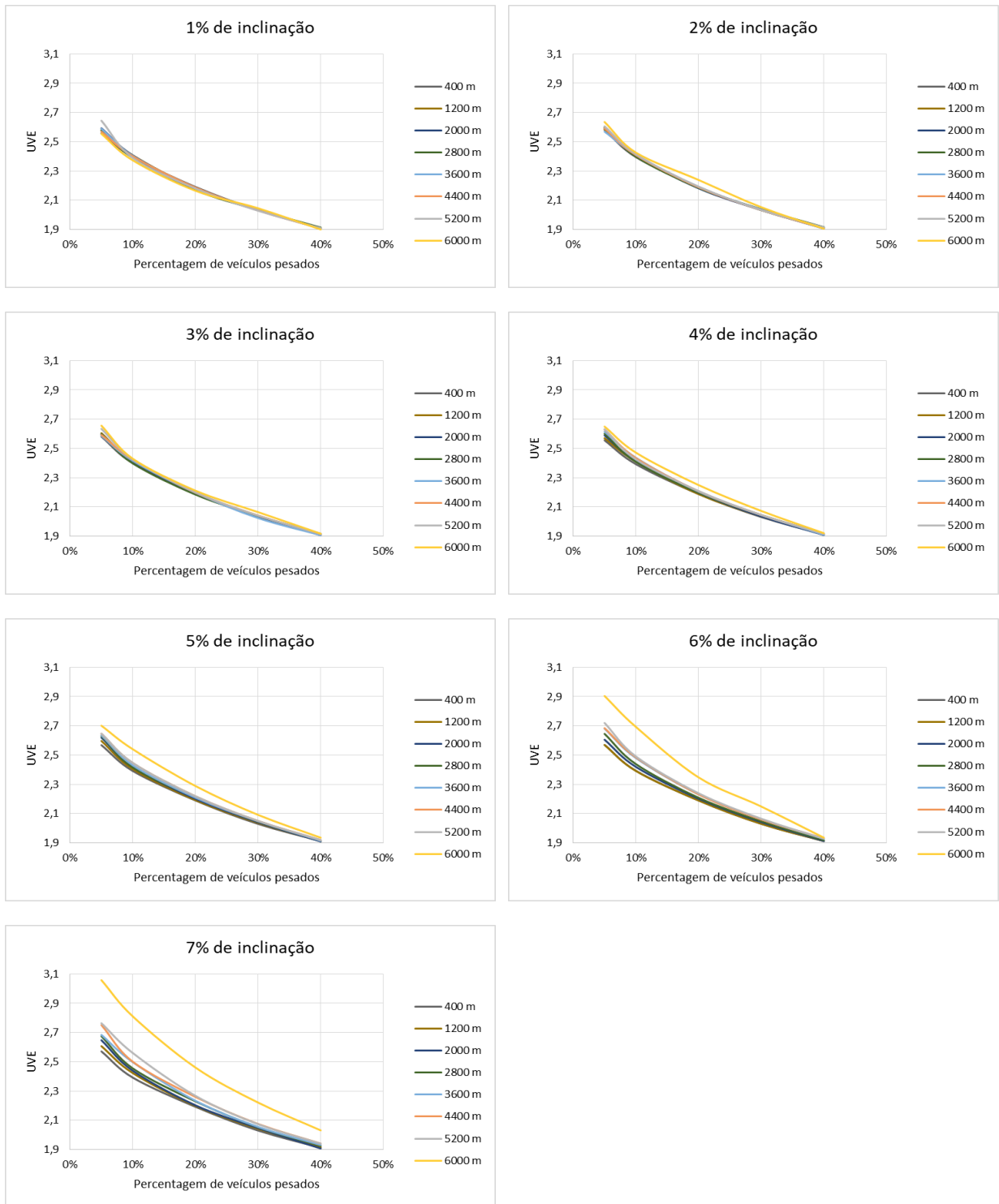


Figura 4.18 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação, extensão do trecho inclinado e percentagem de veículos pesados

Os resultados estão em conformidade com Al-Kaisy e Jung (2004), Giuffré (2015), concluindo também que: quanto maior for a inclinação e a percentagem de veículos pesados, menor é o UVE; quanto menor for a inclinação e a percentagem de veículos pesados, maior é o UVE.

Os valores do HCM são mais baixos para inclinações mais baixas e mais elevados para inclinações maiores, principalmente para 6% de inclinação, 6000 metros de extensão e 5% de veículos pesados, onde o UVE toma um valor de 5,5 e neste estudo, obteve-se um UVE de 3,1 para tais condições. Já para uma inclinação de 1%, 6000 metros de extensão e 5% de veículos pesados, o HCM apresenta um valor de 1,5 para o UVE e neste estudo, obteve um fator UVE de 2,6.

Relativamente à percentagem de veículos pesados, os resultados deste estudo foram muito semelhantes aos de Ingle (2004), uma vez que para 10% de pesados, 4% de inclinação e 800 metros de extensão, o autor obteve um UVE de 2,5 enquanto que neste estudo, se obteve um UVE de 2,4. Já para uma percentagem de 40% de veículos pesados, e para a mesma inclinação e extensão, Ingle (2004) obteve um UVE de 2,0 e neste estudo, o valor obtido foi de 1,9. Para uma inclinação de 6% e 800 metros de extensão, o autor obteve um UVE de 3,5 para 10% de pesados (neste estudo: UVE = 2,7) e de 3,0 para 40% de pesados (neste estudo: UVE = 1,9), sendo uma diferença significativa.

Devido à extensão dos resultados obtidos, no Anexo A encontra-se a tabela com todos os valores, referentes à combinação destas três variáveis.

4.3.2 Método baseado na comparação das velocidades

Avaliação do efeito da percentagem de veículos pesados

O UVE aumenta com o aumento da percentagem de pesados, sendo 4,0 para 5% de veículos pesados e 5,1 para 40% de veículos pesados, como é apresentado na Figura 4.19. Uma vez que este método se baseia na velocidade, esta diminui com a percentagem de veículos pesados, pois os veículos ligeiros têm de adaptar a sua velocidade à dos veículos pesados, que circulam a velocidades mais baixas.

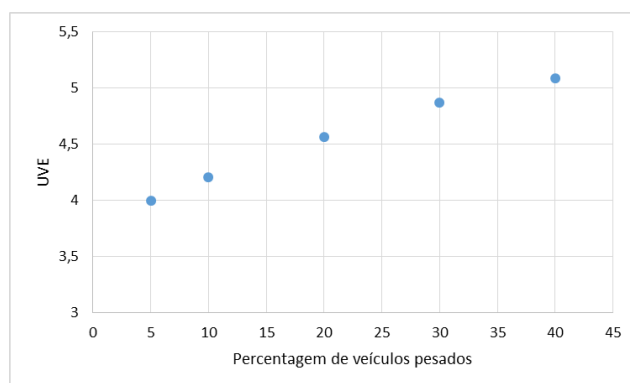


Figura 4.19 - Valores UVE estimados para diferentes percentagens de veículos pesados

Estes resultados foram comprovados por Chandra *et al.* (1994), que também obtiveram um aumento do UVE para o aumento da percentagem de veículos pesados, sendo a variação do mesmo entre 3,15 (para 5% de autocarros) e 3,45 (para 25% de autocarros e camiões de 2 eixos). Os resultados obtidos neste estudo, são superior a esses valores.

Avaliação do efeito do nível de saturação

À medida que o fluxo aumenta, o fator UVE sofre um aumento, uma vez que varia entre 4,1 e 4,6 para uma relação V/C de 50% e de 130%, respetivamente. Estes valores são apresentados na Figura 4.20. Este aumento deve-se ao facto do nível de saturação aumentar, ou seja, começa a haver congestionamento e aumenta a interação entre os veículos ligeiros e os veículos pesados.

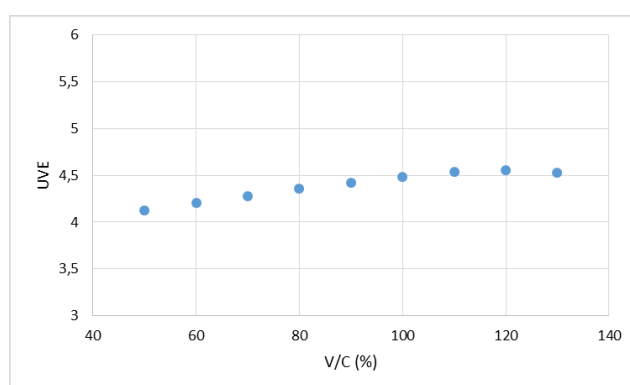


Figura 4.20 - Valores UVE estimados para a variação do nível de saturação

Avaliação do efeito da velocidade

Com o aumento da velocidade, de 60 a 120 km/h, o fator UVE aumenta pouco significativamente, uma vez que varia entre 3,8 e 4,2, como é apresentado na Figura 4.21.

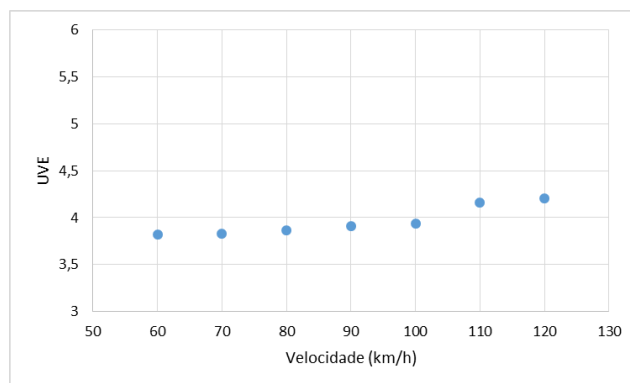


Figura 4.21 - Valores UVE estimados para a variação da velocidade

Avaliação do efeito da inclinação

Verificou-se um aumento pouco significativo do UVE, entre 4,2 e 4,3, para uma variação da inclinação de 1 a 7%, ao contrário do método dos fluxos, onde o aumento foi significativo. A Figura 4.22 mostra a variação do UVE para um tráfego com 10% de veículos pesados e uma extensão de 6000 metros.

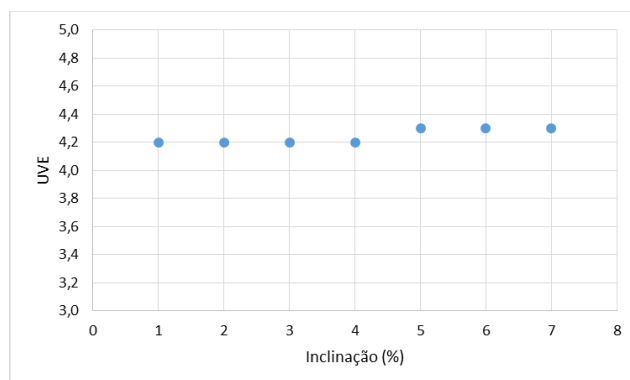


Figura 4.22 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação

Avaliação do efeito do comprimento da rampa

Com o aumento da extensão do trecho inclinado, de 400 a 6000 metros, o fator UVE aumenta mas pouco significativamente, pois atinge um valor de 4,2 para 400 metros e 1% de inclinação e um valor de 4,3 para 6000 metros e 7% de inclinação, como é mostrado na Figura 4.23.

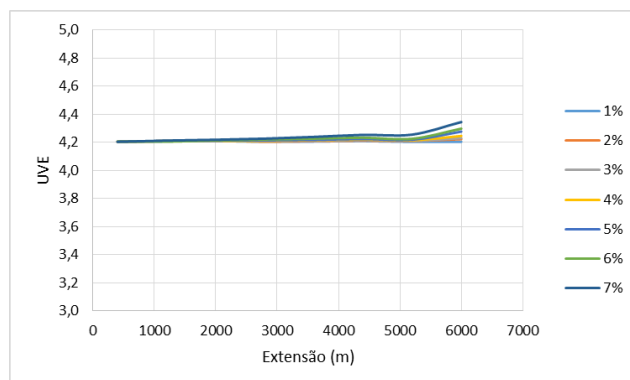


Figura 4.23 - Valores UVE estimados para a variação da extensão

Avaliação do efeito da combinação entre inclinação, extensão e percentagem de veículos pesados

A combinação destas 3 variáveis, provoca um aumento no fator UVE, de 4,0 a 5,3. O primeiro valor foi obtido para 5% de veículos pesados e para quase todas as extensões consideradas, aumentando para 4,1 para inclinações de 6 e 7%, e trechos mais extensos. O segundo valor foi obtido para 40% de veículos pesados, 7% de inclinação e 6000m de extensão. Estes valores são apresentados na Figura 4.24, para 1 e 7% de inclinação. O UVE não sofre um aumento significativo com a inclinação e a extensão, mas sim com a percentagem de veículos pesados.

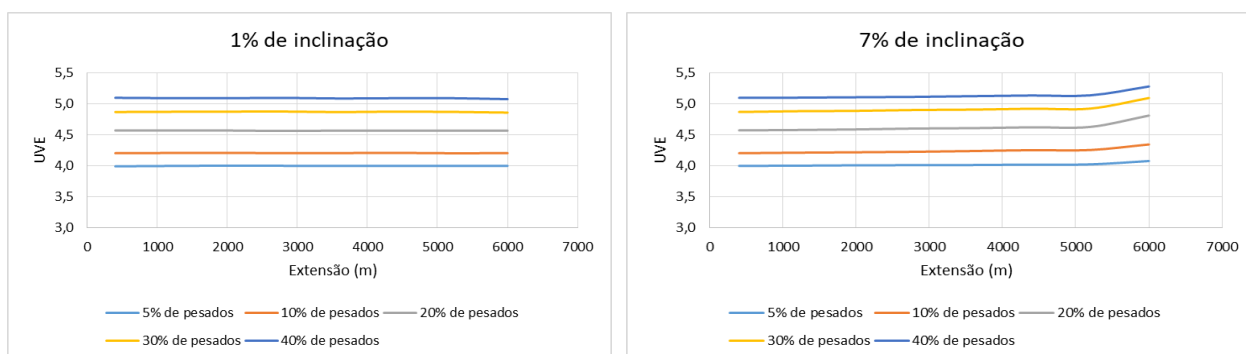


Figura 4.24 - Valores UVE estimados para a variação da inclinação, extensão do trecho inclinado e percentagem de veículos pesados

Como apresentado no Quadro 4.2, para 5% de pesados, o UVE toma valores entre os 4,0 e 4,1, para 10% a variação do UVE é de 4,2 a 4,3, para 20%, de 4,6 a 4,8, para 30%, de 4,9 a 5,1 e para 40%, de 5,1 a 5,3.

Quadro 4.2 – Gama de valores UVE estimados para a variação da inclinação, extensão do trecho inclinado e percentagem de veículos pesados

Percentagem de pesados (%)	Limite inferior do UVE	Limite superior do UVE
5	4,0	4,1
10	4,2	4,3
20	4,6	4,8
30	4,9	5,1
40	5,1	5,3

Devido à extensão dos resultados obtidos, no Anexo A encontra-se a tabela com todos os valores, referentes à combinação destas três variáveis.

4.4 Considerações Finais

De acordo com Giuffré (2015) a diferença entre os valores obtidos e os valores apresentados no HCM devem-se à diferença da definição do UVE aplicada neste estudo, pois segundo Linzer *et al.* (1979), o UVE no HCM (TRB, 2010) foi baseado na equivalência da velocidade de tráfego e neste estudo foi baseado na equivalência da densidade. Além disso, os veículos pesados considerados no modelo de simulação, com um comprimento de 12 metros, são apenas uma parte dos que foram considerados pelo HCM (TRB, 2010) para estimar o UVE.

No Quadro 4.3, faz-se uma comparação dos resultados apresentados no Capítulo 2 com os resultados obtidos neste estudo. Como expectável, os valores do UVE obtidos nesta pesquisa aproximam-se mais dos resultados obtidos pelo HCM (TRB, 2010) e por Giuffré *et al.* (2015). Relativamente aos outros métodos, a maior proximidade verifica-se apenas para as inclinações mais baixas (< 2%).

Quadro 4.3 – Comparação dos valores obtidos na literatura anteriormente apresentada e dos valores obtidos no presente estudo, para o método baseado na comparação dos fluxos

Inclinação (%)	Extensão (km)	% pesados	HCM (2010)	Giuffré et al. (2015)	Al-Kaisy e Rakha (2005)	Ingle (2004)	Cunha e Setti (2011)	Resultados deste estudo	
< 2	1	10	1,50	1,80	2,40	-	2,00	2,40	
		20	1,50	1,70	2,50	-	2,00	2,20	
		30	1,50	1,60	-	-	2,00	2,00	
	2	10	1,50	1,80	2,40	-	2,00	2,40	
		20	1,50	1,70	2,50	-	2,00	2,20	
		30	1,50	1,60	-	-	2,00	2,00	
> 3	1	10	1,50	1,70	3,60	2,50	3,50	2,40	
		20	1,50	1,70	3,10	2,00	3,00	2,20	
		30	-	1,60	-	2,00	3,00	2,00	
	3	10	2,00	1,90	3,50	-	5,00	2,40	
		20	2,00	1,70	3,20	-	4,00	2,20	
		30	-	1,70	-	-	3,50	2,00	
	5	10	2,00	1,90	3,50	-	5,00	2,40	
		20	2,00	1,80	3,20	-	4,00	2,20	
		30	-	1,70	-	-	3,50	2,00	
	> 5	1	10	3,00	2,00	4,70	3,50	5,50	2,40
			20	3,00	1,70	3,80	3,00	4,00	2,20
			30	-	1,60	-	2,50	3,50	2,00
3		10	3,50	2,00	5,40	-	7,00	2,70	
		20	3,50	1,80	3,70	-	5,00	2,30	
		30	-	1,80	-	-	4,00	2,10	
5		10	3,50	2,00	5,40	-	7,00	2,80	
		20	3,50	1,80	3,70	-	5,00	2,50	
		30	-	1,80	-	-	4,00	2,20	

À semelhança do HCM 2010 verifica-se que, os diferentes autores apontam para um aumento do valor de UVE à medida que aumenta a inclinação e o comprimento da rampa, e diminui a percentagem de veículos pesados. Contudo, para uma determinada inclinação e nível de serviço, o valor do UVE diminui com o aumento da percentagem de veículos pesados.

No que diz respeito ao método baseado na comparação das velocidades, os valores obtidos são diferentes daqueles que foram apresentados por Chandra *et al.* (1994), como se pode verificar

no Quadro 4.4, uma vez que o autor considera várias classes de veículos pesados e neste estudo apenas se considera a média.

Quadro 4.4 - Comparação dos valores obtidos na literatura anteriormente apresentada e dos valores obtidos no presente estudo, para o método baseado na comparação das velocidades

Porcentagem de veículos pesados	Chandra <i>et al.</i> (1994)		Neste estudo
	Autocarro	Camião de 2 eixos	
5%	3,15	-	4,00
10%	3,23	-	4,21
20%	3,40	-	4,57
25%	3,45	3,45	4,72

Os resultados obtidos para o fator UVE, através do método baseado na comparação de velocidades foram bastante elevados, comparados com aqueles que foram obtidos através do método baseado na comparação de fluxos, sendo este o método mais viável.

4.5 Análise da existência de via de aceleração

Ao inserir uma via de aceleração no trecho de autoestrada em estudo, verificou-se um aumento geral do fluxo e do atraso, e uma diminuição na velocidade média.

Ao estimar o fator UVE para as situações mencionadas, verifica-se que esta tem maior efeito, se se localizar no início do trecho (a 0 m), pois o UVE estimado é um pouco superior para essa situação, do que para quando não há via, uma vez que o fluxo aumenta. Relativamente às outras localizações, a meio e no fim do trecho, verifica um aumento do fator UVE para um nível de saturação de 130%, uma vez que o volume de tráfego é maior e torna-se mais difícil entrar na corrente principal através da via de aceleração. A Figura 4.25 mostra a tendência dos valores UVE estimados para cada situação analisada, verificando-se que a diferença entre elas não é muito significativa.

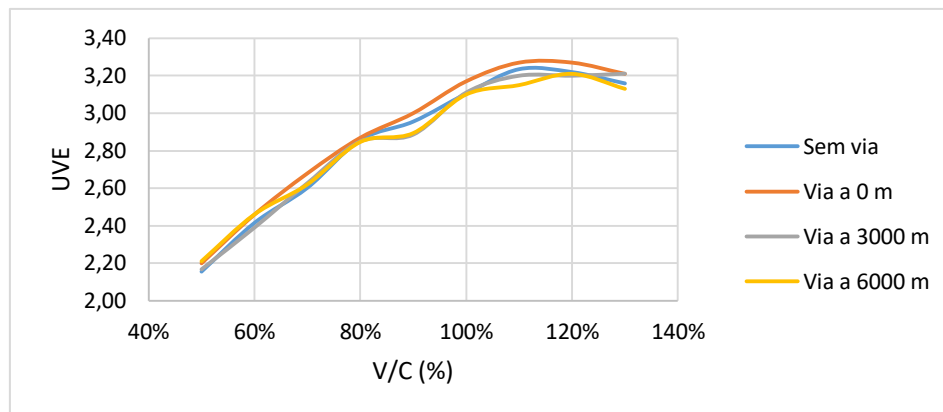


Figura 4.25 – Valores UVE estimados para a inserção de uma via de aceleração

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo centra-se na avaliação do fator de equivalência de veículos ligeiros equivalentes, face à variação de diferentes fatores ligados às condições de tráfego e à infraestrutura.

Para estimar o impacto dos veículos pesados sobre as correntes de tráfego, recorreu-se a técnicas de microsimulação, para avaliar o funcionamento da autoestrada em estudo, com a variação da percentagem de veículos pesados, da inclinação, da extensão do troço inclinado, da relação volume/capacidade, da velocidade e do número de vias. Complementarmente foi analisada a introdução de uma via de aceleração no início, a meio e junto ao final do troço de 6 quilómetros.

Os trabalhos foram suportados pela construção de um modelo no *software* AIMSUN, devidamente calibrado para o efeito. A aplicação deste *software* permitiu avaliar a variação das condições de circulação, tendo por base um conjunto de indicadores de desempenho previamente seleccionados.

Usando os métodos baseados na comparação de fluxos e velocidades, foi possível avaliar o fator de equivalência, comparando um tráfego constituído por veículos ligeiros apenas e um tráfego misto.

À semelhança de Al-Obaedi (2016), verificou-se que a presença de veículos pesados na corrente de tráfego tem um impacto negativo na capacidade da autoestrada devido ao seu comprimento, baixa capacidade de aceleração/desaceleração e capacidade de manobras, aumentando também o impacto negativo nas secções inclinadas e na sua extensão. Estes efeitos foram obtidos através dos resultados do método baseado na comparação dos fluxos, uma vez que o UVE é mais elevado para pequenas percentagens de veículos pesados mas tende a diminuir com o aumento dela, variando entre 1,9 e 2,5. Nas secções inclinadas, o UVE tende a aumentar com o aumento da inclinação, variando de 2,4 a 2,8 (para 10% de pesados), dado que os veículos pesados não têm tanto desempenho na aceleração como os veículos ligeiros. O efeito dos veículos pesados é mais notável em inclinações mais íngremes e de maior extensão, para percentagens mais baixas de veículos pesados, onde a gama de valores do UVE é de 1,9 (40% de pesados) a 3,1 (5% de pesados).

Comparativamente ao HCM (TRB, 2010), os resultados obtidos neste estudo são um pouco diferentes, como já foi explicado no capítulo anterior, dado que a gama de valores é inferior para inclinações baixas e superior para inclinações elevadas, variando entre 1,5 e 7,0.

Relativamente à velocidade, o efeito dos veículos pesados é baixo para velocidades baixas (60 km/h), e tende a aumentar para velocidades mais elevadas (120 km/h), uma vez que os veículos ligeiros têm de adaptar a sua velocidade à dos veículos pesados, que circulam mais devagar.

Com o método baseado nas velocidades, concluiu-se que o UVE aumenta com a percentagem de veículos pesados, sendo a gama de valores entre 4,0 e 5,1. Esta tendência está em conformidade com Chandra *et al.* (1994), uma vez que o UVE também aumenta para a percentagem de veículos pesados (autocarros), apesar dos seus valores serem inferiores aos que foram obtidos neste estudo, devido às diferenças apresentadas anteriormente.

Verificou-se também que o UVE aumenta com o aumento do nível de saturação, variando entre 4,1 e 4,5, à semelhança da tendência da velocidade, sendo a variação do UVE de 3,8 a 4,2. Relativamente à combinação das variáveis inclinação, extensão e percentagem de veículos pesados, os resultados mostram que o efeito destes é maior para inclinações mais íngremes e mais extensas (à semelhança do método baseado na comparação de fluxo) mas aumenta para uma percentagem de 40% de veículos pesados (contrariamente a esse método).

Concluindo a análise dos resultados obtidos neste estudo, é possível afirmar que o método baseado na comparação de fluxos é o que inspira mais confiança, sendo o mais utilizado e a gama de valores é semelhante ao HCM e alguns autores, para algumas condições de tráfego.

Após a realização deste trabalho, é possível concluir que este estudo não representa um produto acabado, uma vez que devem ser desenvolvidas outras pesquisas. Inicialmente, sugere-se outros domínios de aplicação, tais como outras classes de estradas, pois em ambientes urbanos, por exemplo, o efeito é seguramente diferente, devido às baixas velocidades que se praticam.

Tendo em conta que o comprimento do trecho de autoestrada considerado foi de 6 km, seria interessante verificar o efeito de uma extensão maior, para o trecho simulado, de forma a comparar a variação do fator UVE.

De grande interesse será a validação dos resultados com base em dados reais, recolhidos em diferentes pontos da rede nacional. Seria especialmente útil para avaliar o efeito dos veículos pesados num trecho específico.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, U. (2010). "Passenger Car Equivalent Factors for Level Freeway Segments Operating under Moderate and Congested Conditions". Master's Theses. Marquette University. Paper 60. http://epublications.marquette.edu/theses_open/60.
- Alecsandru, C., Ishak, S., QI, Y. (2012). "Passenger car equivalents of trucks on four-lane rural freeways under lane restriction and different traffic conditions". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 39(10): 1145-1155, 10.1139/I2012-098
- Alhassan, H., e Ben-Edigbe, J. (2012). "Evaluation of Passenger Car Equivalent Values under Rainfall". 2012 International Conference on Traffic and Transportation Engineering (ICTTE 2012), IPCSIT vol. 26.
- Al-Kaisy, A., Hall, F., Reisman, E. (2002). "Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow". *Transportation Research Part A* 36, 725-742.
- Al-Kaisy, A., Jung, Y. (2004). "Examining the effect of heavy vehicle during congestion using passenger car equivalents". *Proceedings of 8th International Symposium on Heavy Vehicle Weights and Dimensions Vol. Heavy Vehicle Weights & Dimensions* (pp. 1-10). Pretoria, South Africa: International Forum for Road Transport Technology.
- Al-Kaisy, A., e Rakha, H. (2005). "Developing Passenger Car Equivalency Factors for Heavy Vehicles During Congestion". *Journal of Transportation Engineering*.
- Al-Kaisy, A. (2006). "Passenger Car Equivalents for Heavy Vehicles at Freeways and Multilane Highways: Some Critical Issues". *ITE Journal* 76(3):40-43, March 2006.
- Al-Obaedi, J. (2016). "Estimation of Passenger Car Equivalents for Basic Freeway Sections at Different Traffic Conditions". *World of Engineering and Technology*, 4, 153-159.
- Anu Maria (1997). "Introduction to Modeling and Simulation". *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*.
- Chandra, S., Sikdar, P. K., e Kumar, V. (1994). "Right-turn saturation flow at signalised intersections". Vol.3 No.1 March 1994 *ROAD & TRANSPORT RESEARCH*
- Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte (CCDR-N) (2008). "Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária". Volume 3. Dezembro, 2008.
- Cunagin, W., and Messer, C. (1983). "Passenger Car Equivalents for Rural Highways". *Transportation Research Record* 905. TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 61-68.
- Cunha, A.L., e Setti, J.R. (2011). "Truck Equivalence Factors for Divided, Multilane Highways in Brazil". *Procedia – Soc. Behav, Sci*, 16, 248-258.

- Dewar, R., & Olson, P. (2007). "Human Factors in Traffic Safety". Tucson, USA: Lawyers & Judges.
- DNIT (2016). "Manual de Estudos de Tráfego". Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro, 2006. 384 p. (IPR. Publ., 723).
- Elefteriadou, L., Torbic, D., e Webster, N. (1997). "Development of Passenger Car Equivalents for Freeways, Two-lane Highways, and Arterials". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1572, p. 51–58.
- Figueiredo, M., Seco, A., e Bastos Silva, A. (2014). "Calibration of microsimulation models – The effect of calibration parameters errors in the models' performance". Transportation Research Procedia, 3, 962-971.
- Giuffrè, O., Bastos Silva, A., Granà, A., e Chiappone, S. (2015). "Developing passenger car equivalents for freeways by microsimulation". Transportation Research Procedia, 10, 93 – 102.
- Huber, M. (1982). "Estimation of Passenger Car Equivalents of Trucks in Traffic Stream". Transportation Research Record 869. TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 60-70.
- Ingle, A. (2004). "Development of Passenger Car Equivalents for Basic Freeway Segments". Masters. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Krammes, R., e Crowley, K. (1986). "Passenger Car Equivalents for Trucks on Level Freeway Segments". Transportation Research Record 1091. TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 10-17.
- Law, A. M., e Kelton, W. D. (1991). "Simulation Modeling and Analysis". Second Edition. McGraw-Hill Book Co., ISBN 0-07-100803-9.
- Linzer, E., Roess, R., e McShane, W. (1979). "Effect of Trucks, Buses, and Recreational Vehicles on Freeway Capacity and Service Volume". Transportation Research Record 699. TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 17-24.
- Mauro, R., Giuffrè, O., Granà, A., e Chiappone, S. (2014). "A Statistical Approach for Calibrating a Microsimulation Model for Freeways". WSEAS Transactions on Environment and Development 10, 496-508.
- May, A. D. (1990). "Traffic Flow Fundamentals". Prentice Hall, Inc. USA.
- Sarvi, M. (2011). "Heavy commercial vehicles-following behavior and interactions with different vehicle classes". Journal of Advanced Transportation, 47, 572-580.
- Seguin, E., Crowley, K., and Zweig, W. (1992). "Passenger Car Equivalents on Urban Freeways". Report DTFH61-80-C-00106, FHWA, U.S. Department of Transportation.
- Shalini, K., e Kumar, B. (2014). "Estimation of the Passenger Car Equivalent: A Review". IJETAE, Volume 4, Issue 6, Junho 2014.

- St John, A., and Glauz, W. (1976). "Speeds and Service on Multilane Upgrades". Transportation Research Record 615. TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 4-9.
- Tavares, J. P. (2016). "Modelos de Macro-Simulação". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- TRB. (2000). HCM - Highway Capacity Manual. Washington D.C., USA: Transportation Research Board – National Research Council.
- TRB. (2010). HCM - Highway Capacity Manual. Washington D.C., USA: Transportation Research Board – National Research Council.
- Webster, N., and Elefteriadou, L. (1999). "A Simulation Study of Truck Passenger Car Equivalents (PCE) on Basic Freeway Sections". Transportation Research, Vol. 33B, pp. 323-336.
- West, J., e Thurgood, G (1995). "Developing Passenger-Car Equivalents for Left-Turning Trucks at Compressed Diamond Interchanges". Transportation Research Record 1484. TRB, National Research Council, Washington, DC., pp. 90-97.
- Wu, N. (2002). "A new approach for modeling of fundamental diagrams". Transportation Research Part A, Policy Pract. 36 (10), 867-884.
- Xiao, H., Ambadipudi, R., Hourdakis, J., e Michalopoulos, P. (2005). "Methodology for Selecting Microscopic Simulators: Comparative Evaluation of AIMSUN and VISSIM". Intelligent Transportation Systems Institute, Report no. CTS 05-05.
- Yeung, J. S., Wong, Y. D. e Secadiningrat, J. R. (2015). "Lane-harmonised passenger car equivalents for heterogeneous expressway traffic". Transportation Research Part A, 78 (2015) 361-370.

7 ANEXOS

ANEXO A

Método baseado na comparação de fluxos

Inclinação	Extensão	% pesados				
		5%	10%	20%	30%	40%
1%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	1200 - 2000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2000 - 2800m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2800 - 3600m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	3600 - 4400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	4400 - 5200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	5200 - 6000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
2%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	1200 - 2000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2000 - 2800m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2800 - 3600m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	3600 - 4400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	4400 - 5200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	5200 - 6000m	2,6	2,4	2,2	2,1	1,9
3%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	1200 - 2000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2000 - 2800m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2800 - 3600m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	3600 - 4400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	4400 - 5200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	5200 - 6000m	2,7	2,4	2,2	2,1	1,9
4%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	1200 - 2000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2000 - 2800m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
	2800 - 3600m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9

	3600 - 4400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	4400 - 5200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	5200 - 6000m	2,6	2,5	2,2	2,1	1,9	
5%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	1200 - 2000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	2000 - 2800m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	2800 - 3600m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	3600 - 4400m	2,6	2,4	2,2	2,1	1,9	
	4400 - 5200m	2,7	2,5	2,2	2,0	1,9	
	5200 - 6000m	2,7	2,5	2,3	2,1	1,9	
	6%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
		400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9
1200 - 2000m		2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
2000 - 2800m		2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
2800 - 3600m		2,7	2,5	2,2	2,1	1,9	
3600 - 4400m		2,7	2,5	2,2	2,1	1,9	
4400 - 5200m		2,7	2,5	2,2	2,1	1,9	
5200 - 6000m		2,9	2,7	2,3	2,1	1,9	
7%	0 - 400m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	400 - 1200m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	1200 - 2000m	2,6	2,4	2,2	2,0	1,9	
	2000 - 2800m	2,7	2,5	2,2	2,1	1,9	
	2800 - 3600m	2,7	2,5	2,2	2,1	1,9	
	3600 - 4400m	2,8	2,5	2,3	2,1	1,9	
	4400 - 5200m	2,8	2,6	2,3	2,1	1,9	
	5200 - 6000m	3,1	2,8	2,5	2,2	2,0	

Método baseado na comparação de velocidades

Inclinação	Extensão	% pesados				
		5%	10%	20%	30%	40%
1%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1

2%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
3%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
4%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
5%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,0	4,3	4,7	4,9	5,1
6%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,1	4,3	4,7	5,0	5,1

7%	0 - 400m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	400 - 1200m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	1200 - 2000m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2000 - 2800m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	2800 - 3600m	4,0	4,2	4,6	4,9	5,1
	3600 - 4400m	4,0	4,3	4,6	4,9	5,1
	4400 - 5200m	4,0	4,3	4,6	4,9	5,1
	5200 - 6000m	4,1	4,3	4,8	5,1	5,3
