



**MÁRIO SÉRGIO  
PEREIRA ANDRADE**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE VEÍCULOS  
CONECTADOS E AUTÓNOMOS PARA REDUÇÃO  
DE CONSUMOS E EMISSÕES**



**MÁRIO SÉRGIO  
PEREIRA ANDRADE**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE VEÍCULOS  
CONECTADOS E AUTÓNOMOS PARA REDUÇÃO DE  
CONSUMOS E EMISSÕES**

Tese apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Jorge Filipe Marto Bandeira, Bolseiro de Pós-Doutoramento do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro, e da Professora Doutora Margarida Isabel Cabrita Marques Coelho, Professora Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro.

## **o júri**

Presidente

**Professor Doutor Ricardo José Alves de Sousa**  
Professor Auxiliar c/ Agregação, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Orientador

**Doutor Jorge Filipe Marto Bandeira**  
Bolseiro de Pós-Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Arguente

**Professor Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo**  
Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

Este espaço é dedicado a todas as pessoas e entidades que contribuíram para a realização e concretização desta Dissertação.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao meu orientador, Doutor Jorge Bandeira, pela orientação e toda a ajuda prestada ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora, Professora Doutora Margarida Coelho, um especial obrigado pela disponibilidade, exigência e apoio e também por todo o tempo dispensado na ajuda do desenvolvimento desta Dissertação.

Ao Doutor Paulo Fernandes um profundo agradecimento pela disponibilidade demonstrada, pela formação e esclarecimento de dúvidas.

Quero também agradecer ao grupo PTV VISSIM por me ter fornecido uma licença e dado a oportunidade de trabalhar com o software.

Quero agradecer também a todos os meus amigos e colegas que me ajudaram e apoiaram ao longo destes anos e me ajudaram a crescer e a tornar-me na pessoa que sou hoje.

Finalmente à minha família uma palavra de apreço pelo apoio, paciência e incentivos ao longo desta etapa universitária, principalmente aos meus pais que sempre ajudaram em todas as situações e estiveram sempre presentes nos bons e maus momentos.

Este trabalho insere-se igualmente no âmbito dos seguintes projetos: @CRUISE (PTDC/EMS-TRA/0383/2014), financiado no âmbito do Projeto 9471 – Reforçar a Investigação, o Desenvolvimento Tecnológico e a Inovação (Projeto 9471 – RIDTI) e participado pelo Fundo Comunitário Europeu FEDER; MobiWise (POCI-01-0145-FEDER-016426); DICA-VE (POCI-01-0145-FEDER-029463); inFLOWence (POCI-01-0145-FEDER-029679); Projeto Estratégico UID-EMS-00481-2013-FCT e CENTRO-01-0145-FEDER-022083.

## palavras-chave

CAV, veículos autônomos, metodologia VSP, base de dados

## resumo

No setor dos transportes prevê-se um avanço tecnológico significativo, quer ao nível da introdução de sistemas inteligentes transportes cooperativos, quer através da progressiva introdução de veículos com um grau crescente de autonomia. Este avanço tecnológico pode originar ganhos significativos na segurança e eficiência do sistema de transportes. O principal objetivo desta Dissertação consiste no estudo do potencial dos veículos conectados e autônomos (CAV) na redução de consumos de combustível e de emissões de poluentes através de funções de desempenho operacional em diferentes tipologias de artérias rodoviárias. Neste trabalho foram selecionados quatro troços de vias rodoviárias de uma cidade portuguesa de média dimensão (Aveiro) para recolher dados retirados através de microssimulação com recurso ao software VISSIM. Tendo como objetivo avaliar o nível de emissões que advém da introdução de CAV na rede de tráfego é analisado um sistema com vários cenários representando taxas de penetração diferentes de CAV e é observado o impacto que estes têm nos veículos convencionais para os diferentes tipos de vias. Assim, de modo a antecipar o que acontece na infraestrutura rodoviária, são relacionados vários conjuntos de dados como as emissões de gases com efeito de estufa (GEE) e a distribuição dos modos da potência específica dos veículos (VSP, que relaciona a dinâmica de um veículo com as suas emissões de poluentes). Os resultados obtidos sugerem que é possível obter reduções das emissões com a introdução dos CAV no fluxo de tráfego dependendo das características da via. Também sobre este pressuposto é possível obter resultados positivos quando se trata da influência que estes veículos têm sobre os veículos convencionais e quanto maior a taxa de penetração, maior vai ser essa influência chegando a reduções de emissões de CO<sub>2</sub> de 13%. Deste modo, reduções de aproximadamente 18% de emissões totais de CO<sub>2</sub> são obtidas para estradas nacionais e reduções de 18% são obtidas para autoestrada com limitação de velocidade dos CAV. Para ambos os casos, o melhor resultado obtém-se para a maior taxa de penetração. No entanto, quando se trata de vias em meio urbano os resultados não são positivos chegando mesmo a ocorrer um aumento das emissões tanto para os CAV como para os veículos convencionais.

**keywords**

CAV, autonomous vehicles, VSP methodology, database

**abstract**

A significant technological advance is expected in the transportation sector due to the implementation of cooperative intelligent transport systems as well as due to a progressive implementation of vehicles with an increasing degree of autonomy. This technological advance can significantly improve safety and efficiency of the transportation system. This work aims to study the potential impacts of connected autonomous vehicles (CAV) in fuel consumption and pollutant emissions through operational performance functions on different types of roads. In this study, four sections of roadways of a medium-sized Portuguese city (Aveiro) were selected in order to collect data obtained through microsimulation using VISSIM software. This work analyses a system with several scenarios assessing different CAV penetration rates. The main goal is to explore the impact they have on the conventional vehicles on different types of roads. Thus, aiming to anticipate what happens on road infrastructure, several sets of data such as greenhouse gases (GHG) emissions are estimated based on the distribution of vehicle specific power modes (VSP, which associates the vehicle dynamics with its pollutant gas emissions). The results suggest that it is possible to obtain a reduction of gas emissions with the implementation of CAV in traffic flow depending on the road distinguishing features. Under this assumption, it is also possible to get positive results when referring to the effect these vehicles have on the conventional vehicles. It has been shown the higher the penetration rate is, the higher reduction on emissions is observed with a 13% reduction in CO<sub>2</sub> emissions. Thus, a reduction of approximately 18% in CO<sub>2</sub> total emissions is obtained on national roads and a 18% reduction is obtained on highways with speed limit for CAV. On both cases, the best result is obtained with the higher penetration rate. However, as far as the urban area is concerned, the results are not positive and there is even an increase in gas emissions with CAV as well as with conventional vehicles.

# Índice

Índice das figuras .....	i
Índice das tabelas .....	ii
Lista de abreviaturas/ Siglas.....	iii
1. Introdução .....	1
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos .....	6
1.3 Estrutura .....	7
2. Revisão Bibliográfica.....	9
2.1 Comunicações em Veículos Autónomos.....	9
2.2 Cenários de Tráfego .....	11
2.3 Microssimulação de Tráfego e Emissões .....	14
2.4 Síntese .....	15
3. Metodologia .....	19
3.1 Caracterização e Escolha de Troços.....	20
3.2 Modelação de Tráfego.....	23
3.2.1 Modelação da Rede de Aveiro .....	23
3.2.2 Modelação dos CAV – Parâmetros “car following” .....	27
3.2.3 Simulação no VISSIM .....	32
3.2.4 Extração de Dados do VISSIM .....	34
3.3 Metodologia VSP .....	39
4. Discussão de Resultados .....	45
4.1 Análise por troço .....	45
4.1.1 Avenida Lourenço Peixinho.....	45
4.1.2 Avenida 25 de Abril.....	52
4.1.3 Nacional 109 .....	57
4.1.4 A25.....	63
4.2 Análise de Perfis de Velocidade.....	71
5. Conclusões e Trabalho Futuro.....	77
Referências Bibliográficas .....	81
Anexos.....	85
Anexo A – Contagem de peões para a Avenida Lourenço Peixinho .....	85
Anexo B – Contagem de peões para a Avenida 25 de Abril.....	88
Anexo C – Código SQL .....	90

## Índice das figuras

Figura 1 – Emissões de GEE na Europa (Comissão Europeia, 2017).....	1
Figura 2 – Emissões de GEE dentro do setor dos transportes na Europa (Comissão Europeia, 2017) .....	2
Figura 3 – Evolução do setor dos transportes na Europa (Comissão Europeia, 2017).....	2
Figura 4 – Emissões de GEE em Portugal (Fonte: APA).....	3
Figura 5 – Emissões de GEE em Portugal por setor (Fonte: APA).....	3
Figura 6 – Níveis de automação SAE (Baxter et al., 2008) .....	4
Figura 7 – Estrutura da Dissertação .....	7
Figura 8 – Visão geral da metodologia .....	20
Figura 9 – Representação dos troços escolhidos: a) Avenida Lourenço Peixinho; b) Avenida 25 de Abril; c) A25; d) N109 .....	22
Figura 10 – Modelação da rede de Aveiro em VISSIM.....	24
Figura 11 – Dados padrão do Wiedmann 74 (esquerda) e Wiedmann 99 (direita).....	28
Figura 12 – Configuração do comportamento dos CAV.....	31
Figura 13 – Parâmetros da simulação .....	34
Figura 14 – Configuração da base de dados.....	35
Figura 15 – Configuração da recolha de dados .....	35
Figura 16 – Escolha de atributos para base de dados .....	36
Figura 17 – Criação de base de dados .....	37
Figura 18 – Relação entre valores VSP e emissões de a) CO <sub>2</sub> e de b) NO <sub>x</sub> (Fonte: NSCU 2002)..	40
Figura 19 – Taxas de emissão média modal para a) CO <sub>2</sub> em g/s e b) NO <sub>x</sub> em mg/s numa viatura a gasolina com cilindrada inferior a 3,5L (Fonte: NSCU 2002) .....	42
Figura 20 – Comparação entre taxas de emissão média modal para a) CO <sub>2</sub> em g/s e b) NO <sub>x</sub> em mg/s para os veículos ligeiros a diesel EURO II Citroen Jumper 2.5D e EURO III Skoda Octavia TDI 1.9 .....	43
Figura 21 – Comparação das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> em g/km para cada cenário na Avenida Lourenço Peixinho .....	46
Figura 22 – Diagrama de Caixa (Fonte: AGB Consultoria Estatística) .....	47
Figura 23 – Comparação percentual das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na Avenida Lourenço Peixinho .....	48
Figura 24 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO <sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na Avenida Lourenço Peixinho .....	50
Figura 25 – Comparação das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> em g/km para cada cenário na Avenida 25 de Abril.....	52
Figura 26 – Comparação percentual das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na Avenida 25 de Abril.....	54
Figura 27 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO <sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na Avenida 25 de Abril.....	56
Figura 28 – Comparação das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> em g/km para cada cenário na Nacional 109.....	58
Figura 29 – Comparação percentual das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na Nacional 109 .....	60



Figura 30 – Velocidade média de circulação ao longo dos cenários na Nacional 109.....	61
Figura 31 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO <sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na Nacional 109.....	62
Figura 32 – Comparação das emissões de CO <sub>2</sub> em g/km (direita) e respetivas percentagens (esquerda) para cada cenário na A25 .....	65
Figura 33 – Comparação das emissões de a) CO <sub>2</sub> e b) NO <sub>x</sub> em g/km para cada cenário na A25 ...	66
Figura 34 – Comparação percentual das emissões de CO <sub>2</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na A25.....	67
Figura 35 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO <sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na A25...	69
Figura 36 – Velocidade média de circulação dos veículos convencionais ao longo dos cenários na A25.....	70
Figura 37 – Comparação entre velocidade média em km/h e emissões de CO <sub>2</sub> em g/km ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)).....	72
Figura 38 – Comparação entre velocidade média em km/h e emissões de NO <sub>x</sub> em g/km ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)).....	74
Figura 39 – Passadeira sentido Fórum – Ourivesaria, Fonte: Google.....	85
Figura 40 – Passadeira sentido Ourivesaria – Fórum, Fonte: Google.....	85
Figura 41 – Passadeira Junto à Casa Alvarinho, Fonte: Google. ....	86
Figura 42 – Passadeira Junto ao edifício Avenida, Fonte: Google.....	86
Figura 43 – Sentido Ourivesaria – Correios, Fonte: Google.....	86
Figura 44 – Sentido Correios – Ourivesaria, Fonte: Google.....	86
Figura 45 – Sentido Chico – Loja Indiana, Fonte: Google. ....	87
Figura 46 – Sentido Loja Indiana – Chico (da esquerda para a direita na figura), Fonte: Google...	87
Figura 47 – Sentido Tricana – Nanzor, Fonte: Google. ....	87
Figura 48 – Sentido Nanzor – Tricana, Fonte: Google. ....	87
Figura 49 – Passadeira 1 da Avenida 25 de Abril .....	88
Figura 50 – Passadeira 2 da Avenida 25 de Abril .....	89
Figura 51 – Passadeira 3 da Avenida 25 de Abril .....	89

## Índice das tabelas

Tabela 1 – Artigos mais relevantes presentes no Estado da Arte.....	16
Tabela 2 – Cronograma.....	19
Tabela 3 – Parâmetros de validação do VISSIM (Fonte: Bandeira <i>et al.</i> (2018)).....	25
Tabela 4 – Contagem de peões que atravessam as passadeiras da Avenida Lourenço Peixinho .....	26
Tabela 5 – Contagem de peões que atravessam as passadeiras da Avenida 25 Abril .....	26
Tabela 6 – Contagem dos autocarros que circulam nas avenidas principais da cidade de Aveiro entre as 8.00h e as 9.00h (Fonte: Aveiro Bus) .....	27
Tabela 7 – Comparação dos parâmetros padrão do VISSIM e dos parâmetros dos CAV usados neste estudo; parâmetros identificados com um asterisco (*) são referentes ao modelo de mudança de faixa.....	30
Tabela 8 – Variação do número de veículos em cada entrada .....	32
Tabela 9 – Links correspondentes a cada troço escolhido .....	38
Tabela 10 – Modos VSP (Fonte: NSCU 2002).....	41

Tabela 11 – Comparação dos parâmetros dos CAV anteriormente utilizados e dos selecionados para este troço; parâmetros identificados com um asterisco (*) são referentes ao modelo de mudança de faixa.....	64
Tabela 12 – Contagem de peões para a passadeira 1 da Avenida 25 de Abril.....	88
Tabela 13 – Contagem de peões para a passadeira 2 da Avenida 25 de Abril.....	88
Tabela 14 – Contagem de peões para a passadeira 3 da Avenida 25 de Abril.....	89

## Lista de abreviaturas/ Siglas

- ACC – Controlo de velocidade adaptativo (*Adaptive cruise control*)
- AV – Veículos Autónomos
- CACC – Controlo de velocidade adaptativo e cooperativo (*Cooperative adaptive cruise control*)
- CAV – Veículos Autónomos e Conectados
- CO – Monóxido de carbono
- CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono
- DEM – Departamento de Engenharia Mecânica
- DGEG – Direção Geral de Energia e Geologia
- DSRC – Comunicações dedicadas de curto alcance (*Dedicated short-range communication*)
- Eco-SMD – Modelo de condução inteligente ecológica (*Ecological Smart Driver Model*)
- GEE – Gases com Efeito de Estufa
- GPS – Sistema global de posicionamento (*Global positioning system*)
- GSM – Sistema global de comunicações móveis (*Global System for Mobile Communications*)
- HC – Hidrocarbonetos
- HVO – *High Occupancy Vehicles*
- MASCAT – *Multi-agent simulator of connected and automated traffic*
- N109 – Nacional 109
- NO<sub>x</sub> – Óxidos de azoto
- PM2.5 – Material particulado com menos de 2,5 micros (*Particulate matter 2,5 microns and below*)
- SAE – *Society of Automotive Engineers*
- V2I – Comunicações entre Veículos e Infraestruturas
- V2V – Comunicações entre Veículos
- VSP – *Vehicle Specific Power*

VT-Micro – Simulador microscópico de energia e emissões *Virginia Tech (Virginia Tech microscopic energy and emission model)*

# 1. Introdução

## 1.1 Motivação

Um dos temas atuais mais preocupantes que tem vindo a ser debatido ao longo dos anos é o das alterações climáticas. Este é um tema que afeta toda a humanidade e o planeta. Esforços globais têm vindo a ser feitos para combater a situação atual e mais esforços terão que vir a ser feitos. São exemplos desses esforços o Protocolo de Quioto e mais recentemente o Acordo de Paris (Comissão Europeia, 2017).

O setor dos transportes é dos que mais contribui para a emissão de gases com efeito de estufa (GEE) e para a poluição em zonas urbanas, contribuindo com quase um quarto do total das emissões de GEE na Europa – Figura 1. Na Europa, os transportes rodoviários representam cerca de 73% das emissões de GEE produzidas pelos transportes (Comissão Europeia, 2017), tal como representado pela Figura 2. Um crescimento neste setor implica maior quantidade de emissões logo, medidas de mitigação de emissões de carbono terão que ser tomadas e respeitadas.

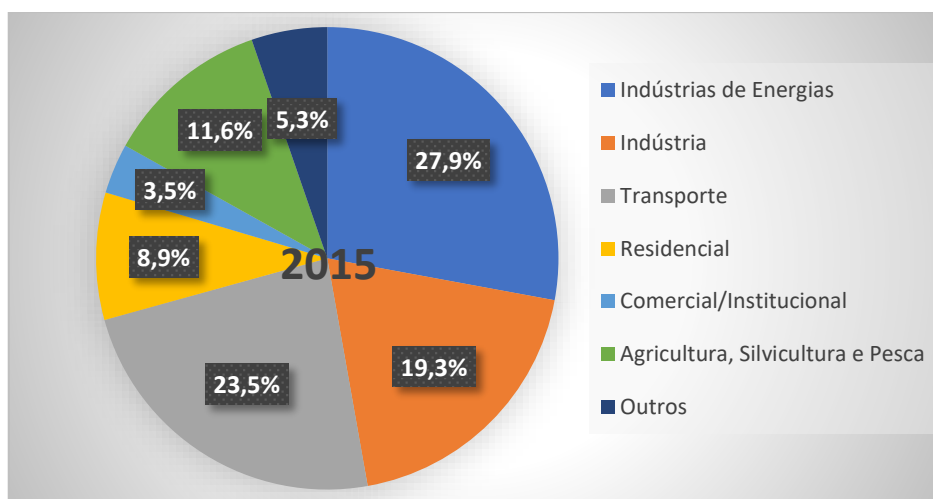


Figura 1 – Emissões de GEE na Europa (Comissão Europeia, 2017)

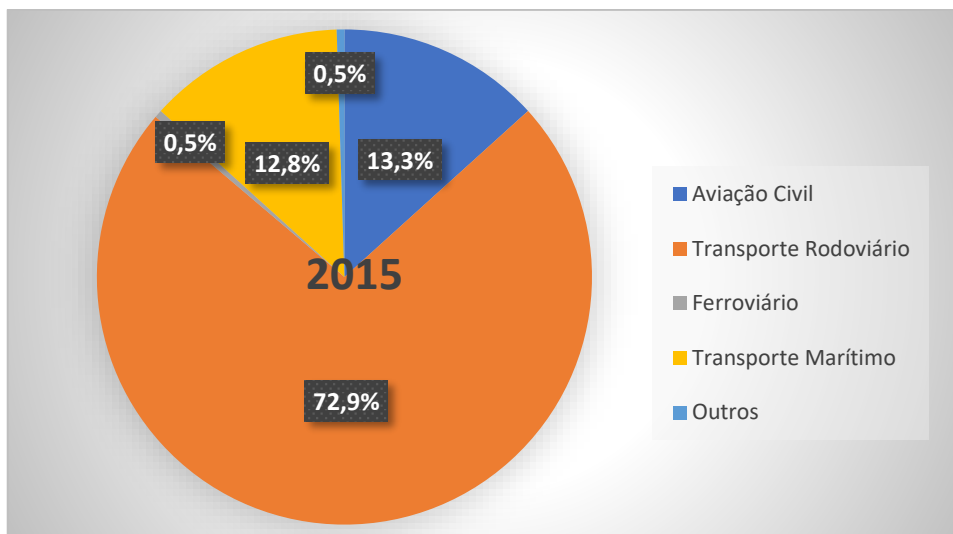


Figura 2 – Emissões de GEE dentro do setor dos transportes na Europa (Comissão Europeia, 2017)

Na Figura 3 pode-se observar um crescimento do setor dos transportes até ao ano de 2007, com um decréscimo acentuado na altura da crise económica (2008-2009) e com um novo crescimento até 2015, sendo previsível uma continuação desse crescimento nos próximos anos (Comissão Europeia, 2017).

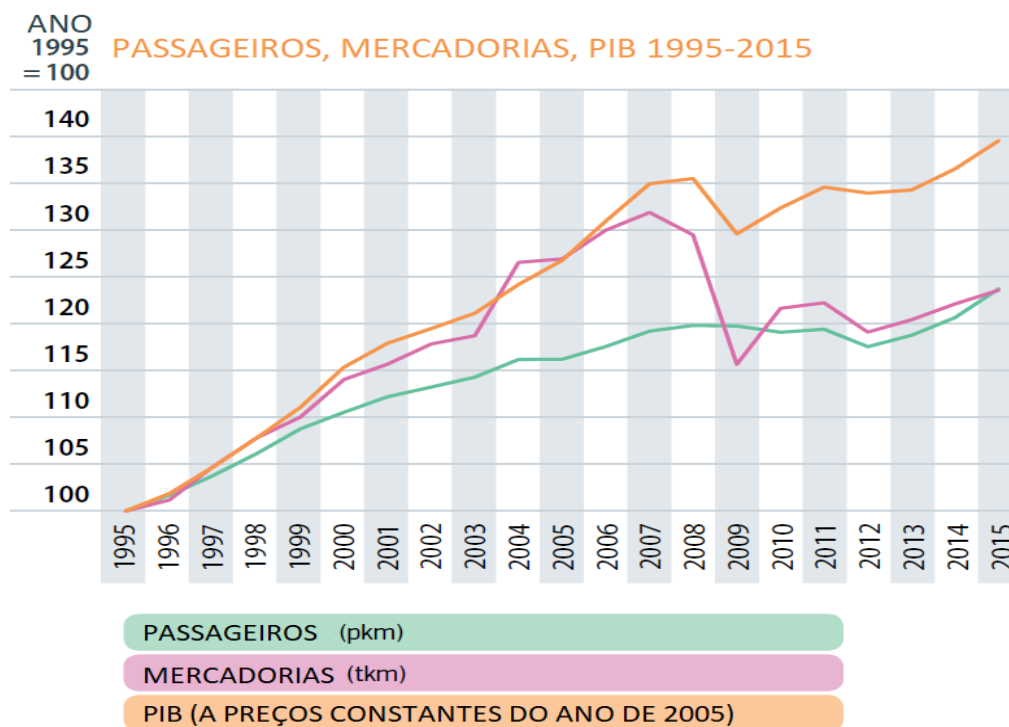


Figura 3 – Evolução do setor dos transportes na Europa (Comissão Europeia, 2017)

Fazendo uma análise mais específica para a situação em Portugal, pode-se observar pela Figura 4 que embora as emissões tenham vindo a diminuir a partir do ano de 2005, entre 2014 e 2015 houve uma inversão dessa tendência. Esta inversão deveu-se ao aumento da produção de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis, como resultado do decréscimo da produção de energia hidroelétrica (Instituto Nacional de Estatística, 2017).

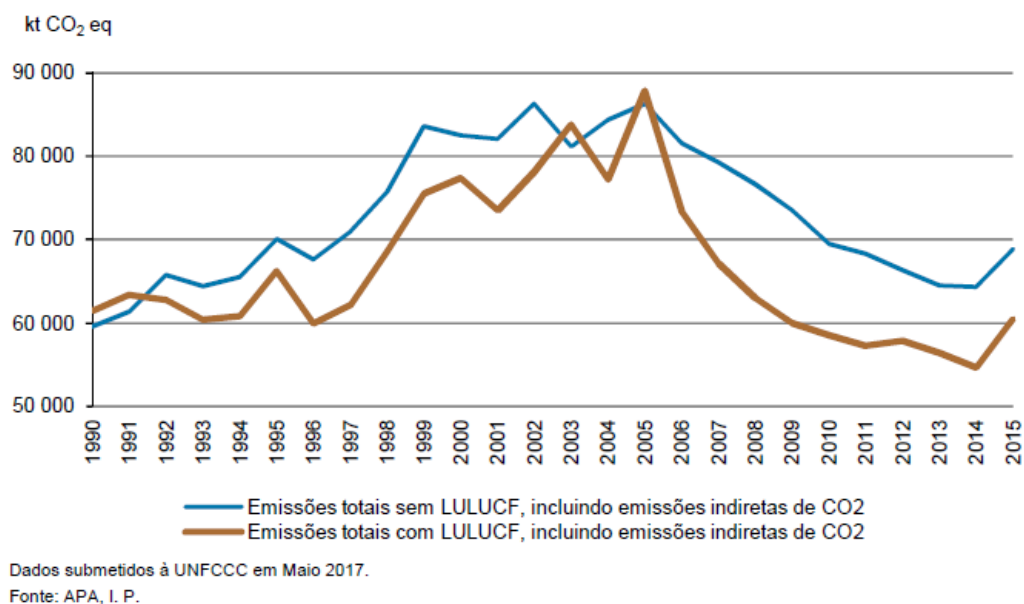


Figura 4 – Emissões de GEE em Portugal (Fonte: APA)

Se se voltar a fazer uma análise por setor, verifica-se que o setor dos transportes é o segundo maior contribuinte para as emissões de GEE como se pode observar pela Figura 5.

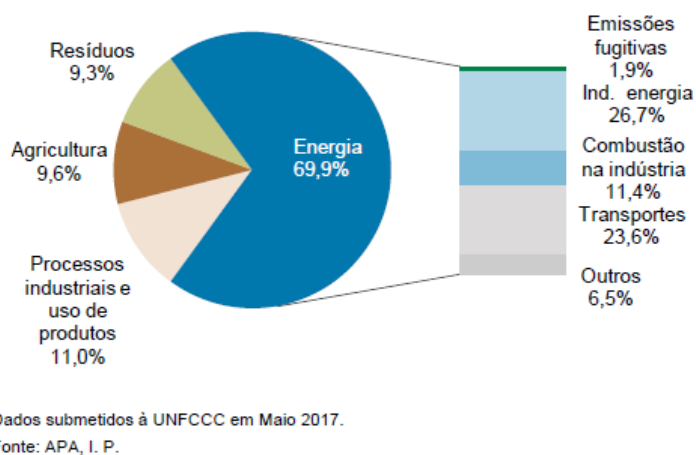


Figura 5 – Emissões de GEE em Portugal por setor (Fonte: APA)

Em Portugal, o gasóleo continua a ser o combustível mais usado com cerca de 77,5% do consumo de combustíveis pertencente a este tipo (INE, 2017). Apesar dos veículos a gasóleo terem níveis de produção de CO<sub>2</sub> mais baixos do que os a gasolina, estes são os principais produtores de NOx. Isto gera vários problemas em termos de poluição principalmente dentro das cidades, pois o NOx (precursor do ozono troposférico) é prejudicial à saúde. Várias normas têm vindo a ser implementadas para retirar os veículos a combustão interna dos grandes centros metropolitanos, normas essas que podem levar as pessoas a optar por veículos mais amigos do ambiente num futuro próximo. No entanto, estas normas não são suficientes para diminuir significativamente a emissão total dos GEE (O'Driscoll *et al.*, 2018).

Com o intuito de se obter esta diminuição tem havido uma crescente evolução das tecnologias implementadas nos veículos. Uma prova desta evolução são os veículos autónomos (AV) que têm vindo a ser introduzidos ao longo dos anos com um nível automação cada vez maior. Um dos níveis de automação mais alta existente neste momento nas estradas é o exemplo do *Autopilot* da Tesla com um nível de automação 3 que já permite que o veículo tome decisões de velocidades, acelerações e direção através da assistência de sensores instalados que fazem uma análise do ambiente à sua volta (Banks, Plant e Stanton, 2018). Na Figura 6 são apresentados os níveis de automação SAE (Sociedade de Engenheiros da Mobilidade, organização responsável pela engenharia automóvel).

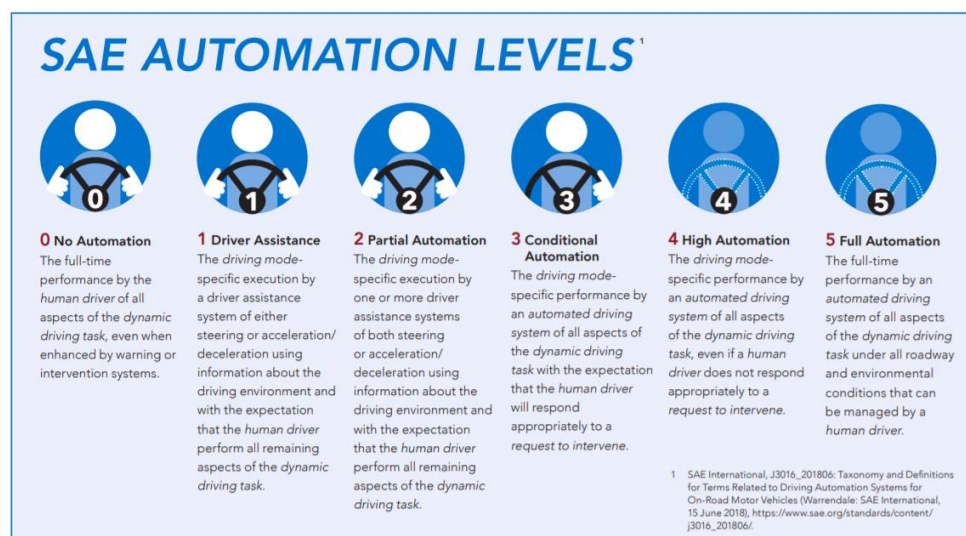


Figura 6 – Níveis de automação SAE (Baxter et al., 2008)

Uma próxima evolução desta tecnologia é a introdução dos veículos autónomos e conectados (CAV). Estes são veículos que, além da tecnologia já presente nos AV, apresentam

uma tecnologia que permite manter uma constante troca de informações através de comunicações entre veículos (V2V) e comunicações entre veículos e infraestruturas (V2I). As comunicações V2V permitem ao veículo ter informações sobre os veículos que se encontram à sua volta, enquanto que as comunicações V2I permitem obter informações sobre o estado de um semáforo ou a existência de algum incidente em tempo real. Assenta, no entanto, na necessidade de haver uma boa conexão para a transmissão de informação. Esta conexão é feita através de comunicações *wireless* tais como Wi-Fi, DSRC, *Bluetooth* e redes móveis. Este tipo de tecnologia pode vir a melhorar a segurança nas estradas bem como o desempenho dos veículos e de forma indireta o desempenho do tráfego, ao influenciar os veículos à sua volta. Os CAV podem também vir a trazer bastantes benefícios em termos de melhoria do uso do tempo de viagem, melhoria da capacidade das estradas e melhoria do consumo de combustível levando assim a uma redução dos impactes ambientais. Devido à sua alta capacidade de conectividade os CAV podem vir a reduzir os congestionamentos e graças à sua condução mais suave é de esperar que tenham consumos de combustível e produção de emissões mais baixos. Devido ao seu tempo de reação menor comparado com veículos convencionais é de esperar um aumento da capacidade das estradas devido à diminuição das distâncias entre veículos (Conlon, Ballare e Lin, 2018; Gueriau, Billot e Faouzi, El, 2017).

Graças à capacidade que estes veículos apresentam de conduzirem sozinhos é de esperar uma redução do valor associado ao custo de tempo de viagem devido ao tempo gasto dentro deste poder ser gasto em outras atividades além de conduzir. Por exemplo, uma pessoa que trabalhe num escritório poderá usar o tempo de viagem para preparar o seu trabalho, bem como ir ao *email*. No entanto um operário em princípio não poderá usar esse tempo para trabalhar, podendo, porém, relaxar e conviver o que pode também tornar-se útil de outra forma. Assim, para as pessoas que venham a tirar mais proveito do tempo de viagem é mais provável que venham a adquirir um carro autónomo. Isto pode, no entanto, não vir a ser sempre uma vantagem, pois a diminuição deste custo vai provocar uma maior procura deste modo de transporte o que pode aumentar o número de veículos a circular nas estradas, acabando de forma indireta (mais veículos a circular leva a maiores congestionamentos) por voltar a aumentar este custo (Berg, van den e Verhoef, 2016).

A tecnologia CAV pode vir a mudar o sistema de transporte existente. Existem vários cenários de condução exclusivos para estes veículos que podem vir a trazer grandes benefícios nas estradas como: *eco-driving*, capacidade de viajar em pelotão, *rightsizing* (usar a total capacidade dos veículos), partilha do veículo com outras pessoas com o mesmo ou destino parecido, semáforos conectados (constante informação sobre o estado de um semáforo), interceções conectadas e velocidades otimizadas em autoestrada (Gawron *et al.*, 2018).



Entenda-se como *eco-driving* uma forma de conduzir de maneira mais suave de maneira a poupar combustível. Viajar em pelotão é a capacidade que os CAV têm de manter sempre a mesma velocidade e distância em relação ao veículo da frente permitindo formar pelotões em autoestradas de maneira segura. O sistema de GPS também pode ser útil para dissipar o congestionamento. Este permite que, assim que o CAV deteta no sistema de navegação o início de um congestionamento na rota de viagem, este opte pela velocidade ótima de maneira a não ter que efetuar paragem ou mesmo altere o seu trajeto de maneira a evitar esse congestionamento (Stern *et al.*, 2018).

## 1.2 Objetivos

A principal contribuição deste trabalho de Dissertação será a realização de uma análise dos impactos da operação de CAV em diferentes tipologias de vias rodoviárias. Foram avaliadas diversas potencialidades dos CAV para diferentes tipos de vias (ruas urbanas, estrada nacional e autoestrada) tendo em vista a otimização do desempenho energético-ambiental da rede.

Para este fim pretende-se simular uma variedade de cenários de tráfego através da ferramenta de simulação VISSIM de modo a concluir eventuais influências positivas ou negativas da inserção de CAV nas estradas.

Os cenários de estudo serão realizados na cidade de Aveiro, dois em zona urbana, sendo estes a Avenida Lourenço Peixinho e a Avenida 25 de Abril, um trajeto da autoestrada A25 e um trajeto da estrada nacional 109.

Os CAV tanto poderão ser considerados com motor a combustão interna como com motor elétrico (e desta forma não produtores de emissões *in situ*) sendo, portanto, realizado uma avaliação das emissões locais na rede e também uma avaliação do impacto que estes veículos terão no desempenho de tráfego para cada caso de estudo.

Deste modo, foram seguidas as seguintes etapas:

- Análise bibliográfica relevante para o estudo;
- Pesquisa dos valores dos parâmetros de comportamento dos CAV a inserir no modelo microscópico de tráfego;
- Determinação de quais os melhores parâmetros a avaliar;
- Modelação do sistema rodoviário da cidade de Aveiro;
- Simulação de diversos cenários;
- Exportação dos dados obtidos de modelo de tráfego para um modelo de emissões;
- Análise dos resultados e conclusões.

## 1.3 Estrutura

Com o intuito de melhorar a experiência do leitor e garantir uma melhor percepção do trabalho efetuado, esta secção dá a conhecer todos os capítulos que irão ser desenvolvidos posteriormente. Deste modo, esta Dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos principais, os quais se encontram organizados em subcapítulos, tal como apresentado na Figura 7.

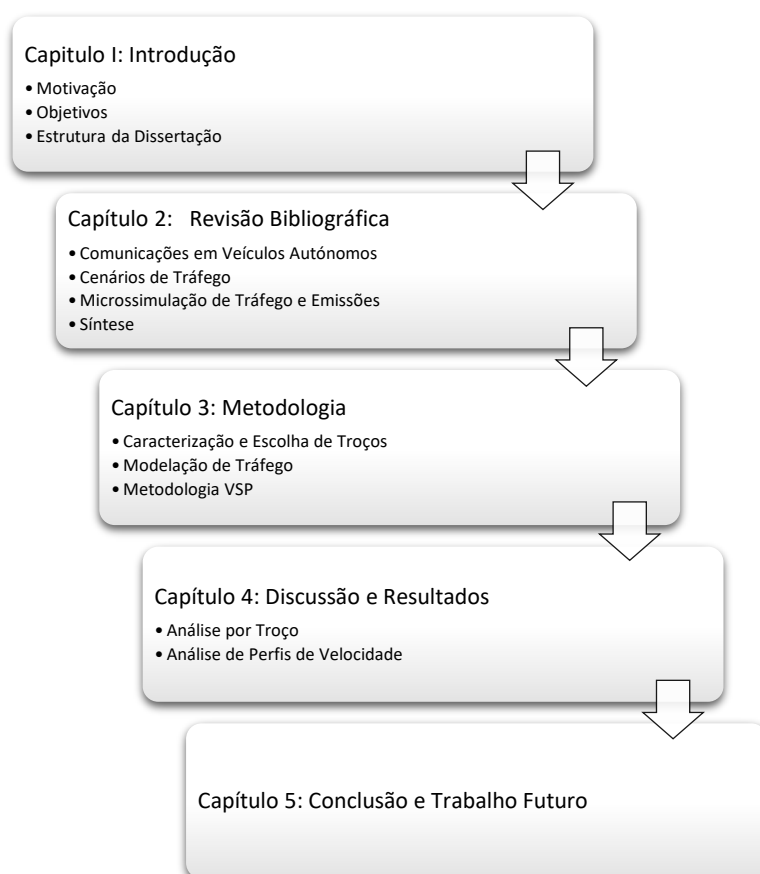


Figura 7 – Estrutura da Dissertação

Uma introdução ao trabalho realizado é apresentada no capítulo inicial organizada em três secções, uma primeira onde se demonstra a motivação que levou à realização desta Dissertação após a qual são apresentados os objetivos a atingir, que culmina na apresentação de uma estrutura que se considera devidamente apropriada para o estudo.

Num segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica relevante para esta Dissertação abordando tópicos relacionados com as tecnologias inerentes aos CAV e todo o processo necessário para implementação desta tecnologia em programas de simulação. Este capítulo encontra-se deste modo dividido em: a) Comunicações em Veículos Autónomos onde se estuda

os possíveis benefícios da existência de uma constante comunicação entre veículos (V2V) e entre veículos e infraestruturas (V2I), b) Cenários de Tráfego onde se discute os vários cenários de circulação plausíveis para frota composta por veículos autónomos, c) Microssimulação de Tráfego e Emissões onde se aborda vários trabalhos realizados com programas de microssimulação de tráfego e a sua contribuição para esta Dissertação. No subcapítulo Síntese é realizado um breve resumo desta revisão bibliográfica.

No capítulo subsequente é exposta toda a metodologia adaptada aos objetivos e indispensável para a concretização desta Dissertação. Novamente, este capítulo encontra-se dividido em várias secções. Na secção “Caracterização e Escolha de Troços” é realizada uma pequena análise à escolha dos troços a serem estudados nesta Dissertação. Na secção de Modelação de Tráfego é mostrado todo o procedimento para simulação de CAV em VISSIM. E finalmente na parte Metodologia VSP é apresentada toda a metodologia inerente a este método de cálculo de emissões de poluentes.

O quarto capítulo salienta os resultados obtidos e apresenta uma discussão relativa a estes. Encontra-se dividido em duas secções onde se faz uma análise das emissões para cada troço numa primeira secção denominada de Análise por Troço e são comparadas as emissões de CO<sub>2</sub> com as velocidades médias na secção Análise de Perfis de Velocidade.

Por fim, no quinto capítulo são referidas todas as conclusões obtidas com este projeto e são sugeridas possíveis modificações para um trabalho futuro. É ainda de salientar a existência de anexos que corroboram todo o trabalho realizado nos capítulos apresentados.

## 2. Revisão Bibliográfica

Numa nota introdutória a este capítulo, que tem como propósito dar a conhecer os estudos previamente realizados e utilizados como base desta Dissertação, há que referir que será realizada uma divisão por áreas de estudo, das quais fazem parte as Comunicações V2V e V2I, Cenários de Tráfego e Simulação em VISSIM.

### 2.1 Comunicações em Veículos Autónomos

A transmissão de informação entre veículos (comunicações V2V) e entre veículos e infraestruturas (comunicações V2I) pode ser realizada através de vários protocolos de comunicações. Estes dividem-se em comunicações de longo e curto alcance. Serviços comerciais *wireless* são um exemplo de comunicações de longo alcance. Este tipo de comunicação, que é a usada no serviço de rede dos telemóveis, permite a transferência de dados e voz e pode ser de vários tipos como GSM (*Global System for Mobile*), 3G, 4G, entre outros. Várias marcas automóveis já usam este tipo de comunicações nos seus veículos para tornar possível comunicações entre os *smartphones* e os veículos e até mesmo usar o veículo como um *hotspot*. Como comunicações de curto alcance tem-se as DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*) criadas especificamente para comunicações V2V e V2I com um alcance de aproximadamente 1000 metros, o *Bluetooth* que devido ao seu reduzido alcance poderá ser usado como ligação a um telemóvel de modo a este retransmitir os dados pretendidos e o Wi-Fi - uma tecnologia bastante conhecida globalmente (Anderson *et al.*, 2016).

Com o intuito de melhorar a segurança, a mobilidade, o consumo de energia e a confiança nestes sistemas tem havido uma evolução tecnológica substancial nas comunicações *wireless* no sistema de transportes. Ao incluir estas comunicações nos transportes, várias informações podem ser transmitidas. Em termos de comunicações V2V podem ser transmitidos dados relativos à velocidade, aceleração, travagem e mudança de faixa e no que toca a comunicações V2I tem-se o exemplo dos semáforos onde a temporização dos sinais pode ser transmitida ao veículo de modo a este fazer uma melhor aproximação ou saber o exato momento do arranque ou até mesmo informações relativas ao trânsito permitindo os veículos tomar diferentes decisões de rotas (Lazar, Tiganasu e Caruntu, 2018). A existência de uma transferência de informação instantânea entre veículos permite uma maior rapidez de resposta do condutor a eventuais travagens ou mudanças de faixa repentinas entre outros eventos, ajudando assim na condução e prevenção de situações perigosas (Liu e Khattak, 2016). Particularmente no caso

dos veículos autônomos, combinar a capacidade sensorial e controle inteligente com a capacidade de comunicar com outros veículos (comunicações V2V) e com as infraestruturas (comunicações V2I) resulta numa melhoria das decisões de condução, tais como acelerações ou mudança de via. Estas comunicações tornam a automação dos veículos mais eficiente e mais fiável. Fazendo uma análise da influência destas duas tecnologias no tráfego através de simulações, observa-se uma melhoria na estabilidade do fluxo de tráfego apesar de, ao analisar estas duas em separado, constatar-se que um veículo com unicamente capacidades de comunicação obtém piores resultados no combate à formação de ondas de choque no fluxo de tráfego (para-arranca) do que um veículo com apenas capacidades autônomas. Ao analisar as duas tecnologias em conjunto, o aumento da quantidade de veículos autônomos conectados no fluxo leva a um aumento da capacidade das estradas (Talebpour e Mahmassani, 2016). Uma melhoria na homogeneidade do fluxo é também evidente com este aumento, isto é, menores alterações nas variações de velocidade entre veículos do fluxo e uma melhoria na segurança do tráfego (Gueriau, Billot e Faouzi, El, 2017; Talebpour e Mahmassani, 2016; Wan, Vahidi e Luckow, 2016).

Mais ideias para melhorar a segurança das estradas com as comunicações V2V e V2I têm vindo a ser desenvolvidas como é exemplo o mapeamento de eventos extremos. Uma zona de uma estrada onde tenham acontecido vários acidentes ou travagens bruscas pode ser marcada no mapa e, deste modo, ser criado um histórico partilhado por todos os veículos com capacidades de comunicação. A existência de comunicações instantâneas permite evitar acontecimentos perigosos que possam ocorrer nas estradas, no entanto, estas comunicações podem falhar por vários motivos. Ao existir este mapeamento com um histórico de eventos extremos, o veículo ao aproximar-se de uma zona com elevado número de ocorrências vai ser alertado, no caso de ser um AV, ou vai gerar um alerta para o condutor, no caso de ser um veículo normal, melhorando assim as capacidades de resposta (Liu *et al.*, 2018).

No entanto, na comunicação entre veículos muitos são os problemas que podem surgir. A falha no envio ou receção de dados (*packet loss*) ou os atrasos existentes nas comunicações podem ser problemáticos quando a condução e a segurança do veículo residem nessas comunicações. Também existe a necessidade de garantir que os dados transmitidos sejam precisos, confiáveis e de certa forma completos e ainda o problema de poder ser *hackeado* levantando grandes questões na sociedade do quão confiável poderá ser possuir um veículo deste tipo. Assim, um maior desenvolvimento destas tecnologias é necessário (Jia e Ngoduy, 2016; Vine, Le *et al.*, 2016).

## 2.2 Cenários de Tráfego

Como referido anteriormente, o pressuposto de automação remete para uma maior segurança nas estradas. A elevada capacidade sensorial dos veículos autónomos permite condições de condução não permitidas aos humanos. Deste modo, o tempo de reação de um veículo autónomo vai ser muito menor permitindo manter distâncias relativamente ao veículo da frente muito menores. A habilidade de controlar mais eficazmente a aceleração e travagem do veículo possibilita uma condução única a estes veículos. Assim, a introdução de veículos autónomos permite cenários de tráfego apenas compatível com este modo de condução. Cenários esses como, por exemplo, o viajar em pelotão, condução ecológica, *right-sizing*, controlo do congestionamento, otimização de velocidade de circulação em autoestrada e controlo nas aproximações a semáforos ou interseções. No entanto, benefícios em termos de consumos e energia e emissões de GEE não são garantidos para todos os cenários (Gawron *et al.*, 2018; Wadud, MacKenzie e Leiby, 2016).

A aptidão de viajar em pelotão, conhecida na literatura como *platooning*, baseia-se na capacidade do CAV seguir um veículo líder com um intervalo de espaço bastante pequeno. Os CAV podem, deste modo, criar um pelotão de vários veículos com reduzido espaço entre eles. Sendo um cenário mais usual em autoestrada, a comunicação entre veículos é essencial para garantir a segurança. Isto é conhecido mais concretamente como *CACC (cooperative adaptive cruise control)*, onde uma frota de vários CAV consegue comunicar entre si, mantendo as mesmas velocidades e espaçamentos uns veículos dos outros. Os CAV conseguem, graças a isso, um aproveitamento da aerodinâmica e, deste modo, uma diminuição da força de arrasto provocada nos veículos seguintes ao líder (He e Wu, 2018; Talebpour e Mahmassani, 2016; Zhao e Sun, 2013). Vários estudos têm sido feitos para observar a influência do *platooning* no fluxo de tráfego. Relativamente à capacidade das estradas, vários trabalhos defendem que existe um aumento da capacidade consoante o aumento da taxa de penetração de veículos autónomos no fluxo em autoestrada (Talebpour e Mahmassani, 2016; Zhao e Sun, 2013). Apesar de ser uma prática mais visível e com maior impacto em autoestrada, também se pode verificar um aumento da capacidade das estradas em centros urbanos usando pelotões em interseções com semáforos, na medida em que ao haver um arranque coordenado dos veículos pertencentes ao pelotão, um maior número de veículos vai passar a interseção (Lazar, Tiganasu e Caruntu, 2018; Lioris *et al.*, 2017). Continuando com a formação de ondas de para-arranca no fluxo, é visível, também através de experiências, o impacto positivo que as tecnologias dos CAV têm sobre estas, com uma diminuição das ondas consoante o aumento do número de CAV no fluxo (Gueriau, Billot e Faouzi, El, 2017; Stern *et al.*, 2018; Talebpour e Mahmassani,

2016). Por fim, em termos de consumo de energia, vários autores concluem que a introdução destes veículos no fluxo leva a uma diminuição significativa dos consumos (Conlon, Ballare e Lin, 2018; Gawron *et al.*, 2018; Stern *et al.*, 2018; Zhao e Sun, 2013). Valores como reduções de 42,5% no consumo de energia são referidos (Stern *et al.*, 2018). Em contrapartida são obtidas apenas reduções de 2% do consumo até uma taxa de penetração de 30% de CAV, chegando a diminuir a partir desta percentagem de penetração (Lu, Hu e Dong, 2018). No entanto, a maior parte destes estudos foi feita em estradas de apenas uma via, não tendo conclusões sobre entradas e saídas de veículos do pelotão e como isso influenciaria o consumo de energia.

Graças às suas capacidades sensoriais e comunicativas os CAV conseguem ajustar a sua condução ao ambiente à sua volta. Desta forma, o controlo mais eficiente da aceleração e travagem do veículo, isto é, acelerações e travagens mais suaves, e o controlo da velocidade de viagem (*cruise control*) são exemplos do tipo de condução *eco-driving*. Consequentemente é conseguida uma condução mais suave permitindo um maior conforto para os passageiros e tendo um principal impacto na diminuição de consumos e de emissões. Considerando as emissões de GEE vários estudos falam da capacidade da redução destas que os CAV apresentam. No entanto, o *eco-driving* por si só não leva a grandes reduções nas emissões (1,23%), sendo obtidos, apenas quando considerada uma frota de veículos modernos (após o ano de 2016), resultados significativos de 20% ou 24% de redução (Stogios, 2018; Wadud, MacKenzie e Leiby, 2016). É também concluída uma eficiência maior dos CAV na redução de emissões de GEE em cidade na hora de ponta de 14,5% (Conlon, Ballare e Lin, 2018), em comparação com a redução de apenas 5% considerando o ciclo de vida completo do veículo (Gawron *et al.*, 2018). Relativamente aos consumos, as conclusões nem sempre são as esperadas pois todos os resultados são obtidos a partir de simulações e não existe um teste específico para ciclos de condução de veículos autónomos. No entanto, são referidos possíveis aumentos de consumo de 3% como até melhorias de 10% com níveis de automação baixos (Mersky e Samaras, 2016), e melhorias de 14% dependendo em grande parte do nível tecnológico de automação e dos motores dos veículos (Gawron *et al.*, 2018; Kockelman e Nichols, 2017), sendo de esperar melhorias neste tema com a evolução da tecnologia CAV.

Um CAV tem a aptidão de comunicar com outros veículos e com as infraestruturas presentes nas estradas. Desta maneira, conseguem antecipar várias ocorrências nas estradas. A possibilidade de saber a quantidade de veículos que está numa interceção ou semáforo, se existe uma obstrução na estrada ou algum acidente ao longo da rota de viagem, a duração de um semáforo até se encontrar verde são algumas dos proveitos destas comunicações. Assim os CAV conseguem adaptar a sua condução consoante o que irão encontrar pela frente

proporcionando uma aproximação a semáforos, interseções ou outros eventos de forma diferente do que uma pessoa a conduzir faria (Ilgin Guler, Menendez e Meier, 2014; Kockelman e Nichols, 2017; Liu e Khattak, 2016). Numa aproximação a uma interseção, a tecnologia dos CAV permite diminuir a quantidade de paragens e atrasos existentes. A capacidade de entrada de veículos também aumenta, mas apenas até uma taxa de penetração de CAV de 60%, onde se obtém uma diminuição dos tempos de espera até 60% (Ilgin Guler, Menendez e Meier, 2014). O desenvolvimento/melhoria de um sistema CACC permitiu chegar a reduções de 90% do tempo de espera em interseções e de 45% do consumo de energia. Estes valores ótimos foram obtidos quando a percentagem de veículos integrados com este sistema era máxima e a quantidade de veículos era maior (Zohdy e Rakha, 2016). Quando se trata da fusão de duas vias a tecnologia dos CAV pode ser uma mais-valia no trânsito tanto ao nível de tempo de espera como na quantidade de veículos a entrar na via principal, assumindo, no entanto, um fluxo de veículos totalmente constituído por CAV em perfeita comunicação (Xie *et al.*, 2017). Perante uma interseção com semáforos com uma frota de 10 veículos autónomos, o tempo de passagem destes pela interseção apresenta-se 25% menor do que com veículos convencionais, embora não tenha sido avaliada uma frota com mistura destes veículos (Vine, Le *et al.*, 2016). Os veículos convencionais tendem a efetuar acelerações e travagens descontroladas numa aproximação a um semáforo levando por vezes a acidentes. Isto pode ser controlado com a introdução de CAV no fluxo (Ahmed, Hoque e Khattak, 2018). Ao haver informações do estado do semáforo e tempo restante para ficar verde, o CAV pode adotar uma velocidade ótima de aproximação reduzindo assim as paragens e chegando a haver reduções de 35% de consumo de energia (He e Wu, 2018). É assim concluído que reduções do consumo de energia são conseguidas mesmo com baixas taxas de penetração de CAV, ao fazer aproximações controladas a semáforos acabando por influenciar positivamente os outros veículos não equipados com esta tecnologia (Wan, Vahidi e Luckow, 2016).

Apesar disto, se considerados outros fatores, as melhorias podem não vir a ser tão significativas. O peso elevado do próprio equipamento necessário para tornar o veículo autónomo (como sensores, computador, entre outros) ou os componentes que são montados exteriormente, que aumentam significativamente a força de arrasto, podem vir a provocar um maior consumo de energia. Quando considerado um ciclo de vida completo de um CAV os resultados ambientais podem não ser tão positivos (Gawron *et al.*, 2018). As características únicas dos CAV que permitem as pessoas aproveitar o tempo de viagem para efetuar outras atividades ou mesmo o facto de aumentarem a capacidade das estradas leva à diminuição do custo do tempo de viagem. Apesar de positivo, esta diminuição pode gerar aspetos não tão positivos, como é o caso do aumento da procura destes veículos em alternativa aos transportes



públicos, aumentando assim a quantidade de veículos a circular nas estradas, podendo contribuir para um eventual aumento do consumo de energia. Esta procura pode também ter impactos significativos nos sistemas de estacionamento podendo até levar a alterações nas estruturas das cidades (Berg, van den e Verhoef, 2016).

## 2.3 Microssimulação de Tráfego e Emissões

Vários autores utilizam o PTV VISSIM para microssimulação de tráfego (por exemplo, Bede, Németh e Gáspár, 2017; Eilbert, A., L. Jackson, G. Noel, 2018; Fernandes, Roupail e Coelho, 2017; Habtemichael e Picado-Santos, 2013; Lownes e Machemehl, 2006; Mohd Zulkefli *et al.*, 2017; Stogios, 2018; Xie *et al.*, 2017; Zhao e Sun, 2013). Como este software permite a alteração de vários parâmetros de comportamento dos veículos, é bastante favorável quando se trata de simulação de veículos autónomos. Quando o assunto é a capacidade das estradas, existe uma clara influência dos parâmetros CC0 e CC1 que representam a distância de segurança ao veículo da frente, sendo essa influência tão grande que uma alteração de apenas estes dois parâmetros seria suficiente para obter resultados bastante positivos na melhoria da capacidade. No entanto, após várias combinações de parâmetros, o ponto ótimo é obtido ao combinar CC1 e CC4/CC5 (Lownes e Machemehl, 2006). Passando para as emissões de GEE, obtém-se uma maior influência nos veículos autónomos alterando os parâmetros CC1, CC7 e CC0. Assim, com a alteração destes três parâmetros, é conseguida uma redução de 1,23% de emissões ao avaliar um troço de estrada em ambiente urbano baseando os testes apenas no comportamento de condução (Stogios, 2018). Já numa situação de regime livre, comparando os CAV com os veículos convencionais, uma redução das emissões dos GEE é visível, chegando a aproximadamente 25% a menos de PM2.5 e 20% de CO. No entanto, não são observadas melhorias no que toca ao consumo de energia e emissões de CO<sub>2</sub> (Eilbert, A., L. Jackson, G. Noel, 2018).

Contudo, estes parâmetros não refletem por completo todas as capacidades de um CAV e, quando se trata de fazer uma simulação mais precisa em relação à capacidade de comunicação dos veículos autónomos, vários autores optam pelo auxílio de programação externa através de, por exemplo, *Matlab*. Contudo, valores similares nas reduções de emissões, de consumos e melhoria da capacidade das estradas são observados (Bede, Németh e Gáspár, 2017; Feng *et al.*, 2015; Mohd Zulkefli *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2017; Xie *et al.*, 2017).

Outros autores usaram outros métodos de simulação dos veículos autónomos como é o caso do controlador *FollowerStopper* usado para controlar um veículo autónomo num circuito fechado de uma via para observar as capacidades de este eliminar o congestionamento,

chegando a conclusões de aumento da capacidade da via de 14,1% e diminuições de consumos de combustível de 42,5% (Stern *et al.*, 2018). Ao usar o simulador PLEXE, que representa a fusão de um simulador da rede de tráfego OMNeT++/MiXiM com comunicações V2V e um simulador de tráfego SUMO que permite simular as dinâmicas dos veículos, verificou-se a influência da falha de comunicações para manter um pelotão de veículos conectados estável, confirmando assim a importância de se manter comunicações permanentes entre veículos (Jia e Ngoduy, 2016). Ao propor um modelo de ACC denominado Eco-SMD (*Ecological Smart Driver Model*) para simular o controlo cooperativo dos CAV juntamente com o VT-Micro (simulador microscópico de energia e emissões *Virginia Tech*) verificou-se uma redução exponencial do consumo de combustível comparando com veículos convencionais chegando a aproximadamente 10% quando atingido os 30% de CAV não sendo observáveis reduções relevantes quando este valor era maior (Lu, Hu e Dong, 2018). O MASCAT (*Multi-Agent Simulator of Connected and Automated Traffic*), uma extensão do simulador MovSim desenvolvido para simular os CAV numa estrada com várias vias, é usado para observar a capacidade de homogeneizar o fluxo de tráfego e melhorar a segurança das estradas com resultados positivos logo a partir dos 5% de penetração de CAV (Gueriau, Billot e Faouzi, El, 2017).

## 2.4 Síntese

São vários os autores que chegam a conclusões bastante diversas relativamente à introdução dos CAV no fluxo de tráfego, tanto no que toca à capacidade das vias como ao nível de consumos e emissões. De facto, nem todos defendem que estes possam trazer melhorias ou, pelo menos, diferenças significativas. Problemas nas comunicações entre veículos podem gerar problemas legais e morais que podem levar a um adiamento da introdução dos CAV no tráfego. A falta de experiências de campo é referenciada. Embora se verifiquem vários aspetos positivos, a simulação não corresponde 100% à realidade, sendo complexo antever com precisão alterações decorrentes da introdução dos CAV no fluxo de tráfego.

De seguida é apresentada uma tabela do estado da arte com os artigos mais relevantes para o caso de estudo e algumas das características mais importantes representativas da investigação realizada na área do desempenho ambiental de CAV. Mais concretamente, a Tabela 1 sumariza as plataformas de modelação de tráfego usadas, as variáveis de tráfego analisadas, os modelos de emissões aplicados bem como a respetiva análise, os métodos usados para simular os modelos de *car following* e as limitações presentes em cada estudo.

Tabela 1 – Artigos mais relevantes presentes no Estado da Arte

<b>Artigos</b>	<b>Modelos de Tráfego</b>	<b>Análise de Tráfego</b>	<b>Modelos de Emissões</b>	<b>Análise de Emissões</b>	<b>Métodos para simular os novos modelos de car following</b>	<b>Cenários de tráfego analisados</b>	<b>Limitações</b>
<b>Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments</b>	Não Aplicável	Controlador FollowerStopper. Controlador PI com saturação.	Não Aplicável	Avaliação de consumos através de velocidades e distâncias percorridas.	Controladores de velocidade com base na velocidade do carro da frente.	Engarrafamentos.	Experiência com apenas uma via de rodagem.
<b>Platoon based cooperative driving model with consideration of realistic inter-vehicle communication</b>	PLEXE	Análise de dois modelos de car following.	Não Aplicável	Não Aplicável	Controlo da velocidade a partir das informações obtidas do carro leader do pelotão.	Platooning	Não foi realizada uma análise a nível de emissões.
<b>Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors under Connected-Vehicle Environment</b>	VISSIM	Comparação entre veículos convencionais, ACC e CACC	Não Aplicável	Não Aplicável	Controlo da velocidade a partir das informações obtidas do carro líder do pelotão.	Platooning	Não foi realizada uma análise a nível de emissões. Falta de calibração dos modelos. Falta de modelo de simulação de mudança de faixa.
<b>Fuel economy testing of autonomous vehicles</b>	Não Aplicável	ACC vs CACC	Virginia Tech Comprehensive Fuel Consumption Model	Desenvolvimento de um modelo de consumo de combustível e comparação com existentes	Controlo do comportamento através da análise do comportamento do veículo líder.	Eco-driving	Estratégias de controlo simplificadas. Precisão do modelo de consumo de combustível utilizado.
<b>Determining the effects of automated vehicle driving behavior on vehicle emissions and performance of an urban corridor</b>	PTV's VISSIM 9.0	Comportamento de veículos autónomos	United States Environmental Protection Agency (USEPA); MOVES2014a.	Não Aplicável	Tabela com dados inseridos no VISSIM.	Eco-driving	Estudo realizado apenas para vias urbanas

<b>Analysis of environmental impacts of autonomous vehicles</b>	Não Aplicável	Equações para determinar as velocidades e os volumes de tráfego a inserir no MOVES	MOVES	Comparação do comportamento de um veículo autónomo com o modelo de consumo de combustível EPA	Não Aplicável	Platooning, Eco-driving	Não é considerada a redução do atrito causada pelo platooning. Não são considerados os benefícios das comunicações V2V e V2I
<b>Ecological Adaptive Cruise Control in a Traffic Stream with Mixed Autonomous and Manually Driven Vehicles</b>	Eco-SMD	Comparação com outros modelos (IDM-ACC e Nissan-ACC)	VT-Micro	Aplicação direta do modelo	Eco-SMD	Adaptative cruise control	Não são consideradas as mudanças de faixa. Falta de simulações com outros modelos de condução para o carro leader.
<b>Contribution to the Assessment methodology for Connected and Automated Vehicles on traffic</b>	MASCAT	Análise da introdução de C-ITS (cooperative intelligent transportation systems)	VT-Micro; ARRB; MovSim MC;	Aplicação direta do modelo	Comunicações V2V e V2I	Congestionamento	Não é feita uma comparação com comportamentos de condução reais.
<b>A framework for evaluating energy and emission impacts of connected and automated vehicles through traffic microsimulations</b>	PTV VISSIM	Comparação entre o modelo Wiedmann e CACC	MOVES	Aplicação direta do modelo	CACC	Análise do comportamento CACC através do MIXIC	Limitações do nível de automação. Não são consideradas várias taxas de penetração de CAV

Deste modo, este estudo assenta em três questões fundamentais não abordadas de forma integrada em estudos prévios. Nomeadamente numa fase crítica transitória onde se assume a coexistência de veículos convencionais e CAV, este trabalho pretende abordar as seguintes questões:

1. Qual o potencial de redução de consumos e emissões resultante da operação de CAV em diferentes tipologias de via?
2. Como variam as emissões e consumos da rede em função de diferentes taxas de penetração de CAV?
3. Poderão os CAV influenciar significativamente o desempenho energético e ambiental de veículos convencionais em diferentes tipos de vias?

### 3. Metodologia

No presente capítulo pretende-se traçar toda a metodologia exercitada para a concretização dos objetivos desta Dissertação. Um cronograma de todo o trabalho realizado é apresentado na Tabela 2, com o intuito de facilitar a compreensão da metodologia.

Tabela 2 – Cronograma

Tarefa	fevereiro 2018	março 2018	abril 2018	maio 2018	junho 2018	julho 2018	agosto 2018	setembro 2018	outubro 2018
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Tarefa 1 – Revisão bibliográfica. Revisão do estado da arte no capítulo da penetração no mercado de CAV a curto e médio prazo, impacto ambiental de CAV e microssimulação de CAV.

Tarefa 2 – Adaptação de ferramentas de microssimulação microscópica para simular a dinâmica de CAV.

Tarefa 3 – Avaliação da microssimulação de CAV.

Tarefa 4 – Desenvolvimento de interface entre modelo de microssimulação e modelo de emissões instantâneo

Tarefa 5 – Modelação de emissões de poluentes e consumos de combustível.

Tarefa 6 – Escrita da Dissertação de Mestrado. Defesa da Dissertação de Mestrado.

Para melhor entender o trabalho realizado durante o desenvolvimento desta Dissertação um fluxograma com a visão geral da metodologia é apresentado na Figura 8.

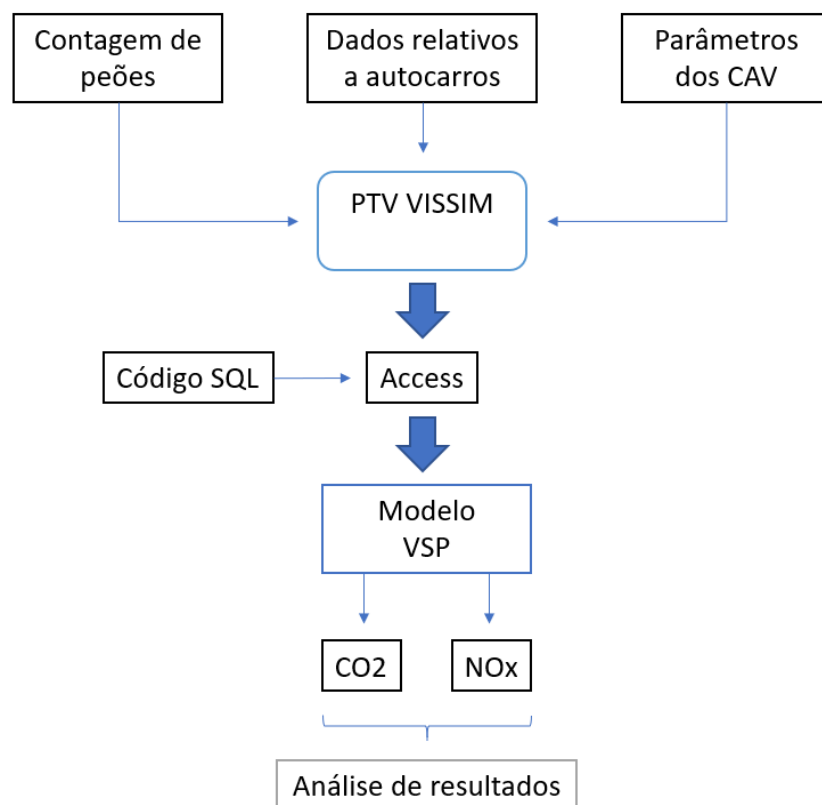


Figura 8 – Visão geral da metodologia

### 3.1 Caracterização e Escolha de Troços

De modo a efetuar um estudo mais abrangente e com um maior potencial de escalabilidade, é imprescindível fazer uma escolha de trajetos com diferentes características no que toca a velocidades de circulação, congestionamento, existência de semáforos, densidade de veículos, entre outros.

Tendo em conta a existência de plataformas de modelação preexistentes e graças à facilidade de recolha de dados adicionais, foi escolhida a cidade de Aveiro para este estudo.

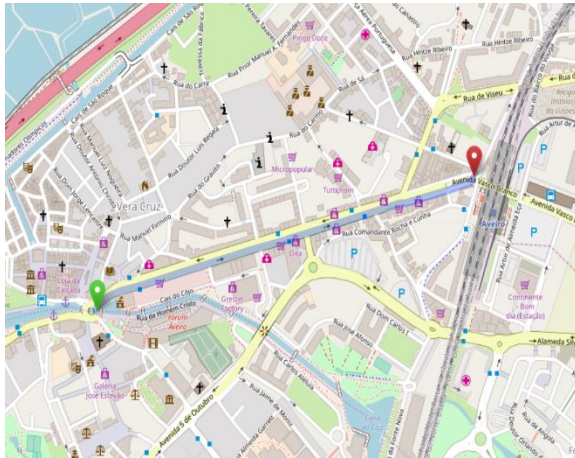
De forma a avaliar mais corretamente o impacto da operação dos veículos CAV, é importante escolher troços de estrada que permitam uma avaliação fidedigna destas características. É, deste modo, importante que a escolha assente nas características da via, tais como:

- Tipo de via:
  - Urbano;
  - Autoestrada;
  - Estrada Nacional;
- Tipos de interseção;
- Caracterização da zona:
  - Comercial;
  - Zona de escolas;
  - Industrial;
- Existência de passadeiras e respetiva densidade de peões;
- Velocidades máximas;
- Quantidade de vias.

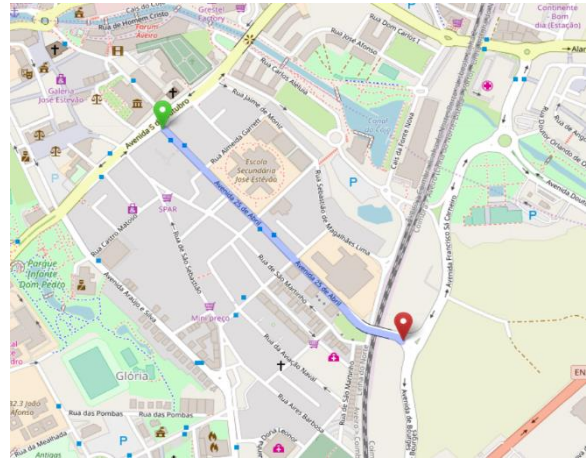
Tendo em conta as características mencionadas, foram selecionados quatro troços com atributos distintos. De salientar que neste estudo não é estritamente necessária a seleção de um trajeto com início e fim pois a simulação em VISSIM recolhe os dados ao longo de cada link (secção de estrada usada na modelação da rede) durante o tempo de simulação. Assim a escolha de vias principais é suficiente para obter os dados desejados (Figura 9).

Ao avaliar as principais vias da cidade, um troço salientou-se em relação aos outros. Sendo uma das avenidas mais movimentadas na cidade de Aveiro, esta é uma zona com elevado comércio e residências e apresenta um considerável número de interceções e passadeiras, bem como semáforos, tornando-a uma zona propícia a engarrafamentos principalmente em hora de ponta. A Avenida Lourenço Peixinho apresenta assim uma combinação de características ótimas para uma avaliação do comportamento dos CAV.

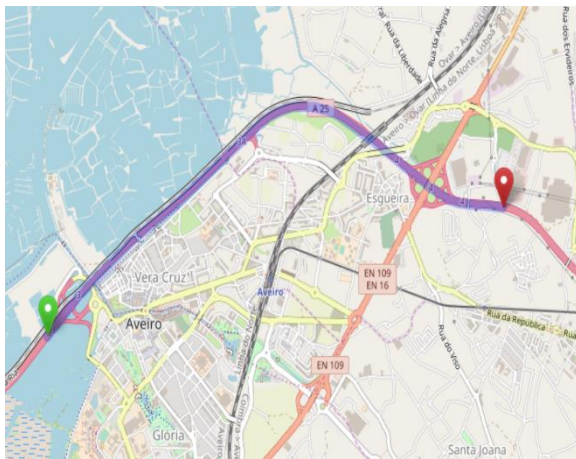




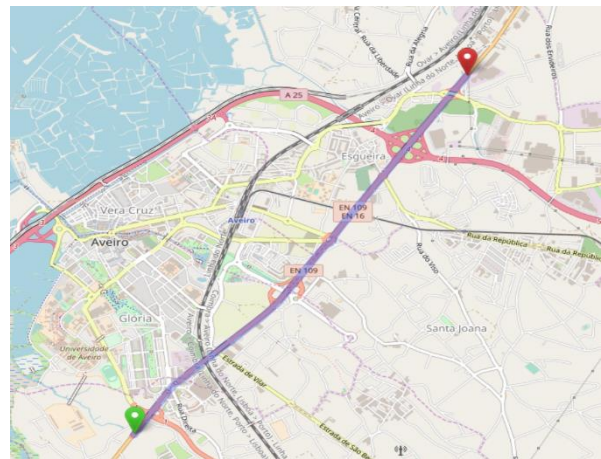
a)



b)



c)



d)

Figura 9 – Representação dos troços escolhidos: a) Avenida Lourenço Peixinho; b) Avenida 25 de Abril; c) A25; d) N109

A Avenida 25 de Abril é outra das principais avenidas de Aveiro. Esta, além de estar inserida numa zona residencial passa por duas escolas e possui várias passadeiras, fazendo dela uma das estradas mais movimentadas em hora de ponta na cidade. A existência de semáforos é um complemento que torna esta avenida um bom local de estudo.

Um trajeto em autoestrada seria essencial para observar o comportamento dos veículos a velocidades elevadas. Um troço da A25 foi assim escolhido entre os nós da Pirâmides e da Zona Industrial de Aveiro.

Como último troço, foi escolhida a estrada nacional 109 (N109) entre o nó da Avenida da Universidade e o nó da A25. Este é um trajeto que permite avaliar o efeito dos CAV em estradas de ambiente urbano, mas com características diferentes, tal como a inexistência de sinalização luminosa e limites de velocidade diferentes ao longo da via. Esta é uma via que apresenta uma velocidade superior à do centro urbano e é um acesso à zona industrial de Aveiro tornando-a também uma estrada altamente movimentada em hora de ponta. Embora nesta via os veículos façam menos paragens, é uma via com um número elevado de interseções podendo levar a congestionamento elevado.

## **3.2 Modelação de Tráfego**

Na presente data fazer experiências de campo com veículos autónomos torna-se difícil devido à existência de uma baixa quantidade deste tipo de veículos. Quando se trata de CAV ainda mais difícil se torna. É assim crucial escolher uma ferramenta de simulação que permita simular o comportamento diferente dos CAV com várias taxas de penetração no tráfego.

O PTV VISSIM é um programa usado para microssimulação de tráfego, isto é, simulação de padrões de tráfego e análise da interação individual de cada veículo numa rede, mais concretamente nesta Dissertação, na rede da cidade de Aveiro. Além de fazer esta análise individual também permite observar a interação entre os veículos através de animações em três dimensões.

### **3.2.1 Modelação da Rede de Aveiro**

O modelo desenvolvido na presente Dissertação foi adaptado a partir de um modelo previamente desenvolvido e calibrado por alunos e investigadores do Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia Mecânica e Automação na plataforma VISSIM (Figura 10). Além da modelação das vias principais da rede viária de Aveiro, esta plataforma simula o número de veículos a entrar em cada via, os limites e reduções de velocidades e as temporizações dos semáforos. O resultado da validação desta plataforma pode ser consultado em diversas fontes nomeadamente, Fontes *et al.* (2014) e Bandeira *et al.* (2018). Desta forma o cenário base analisado é referente à hora de ponta entre as 8.00h e as 9.00h.

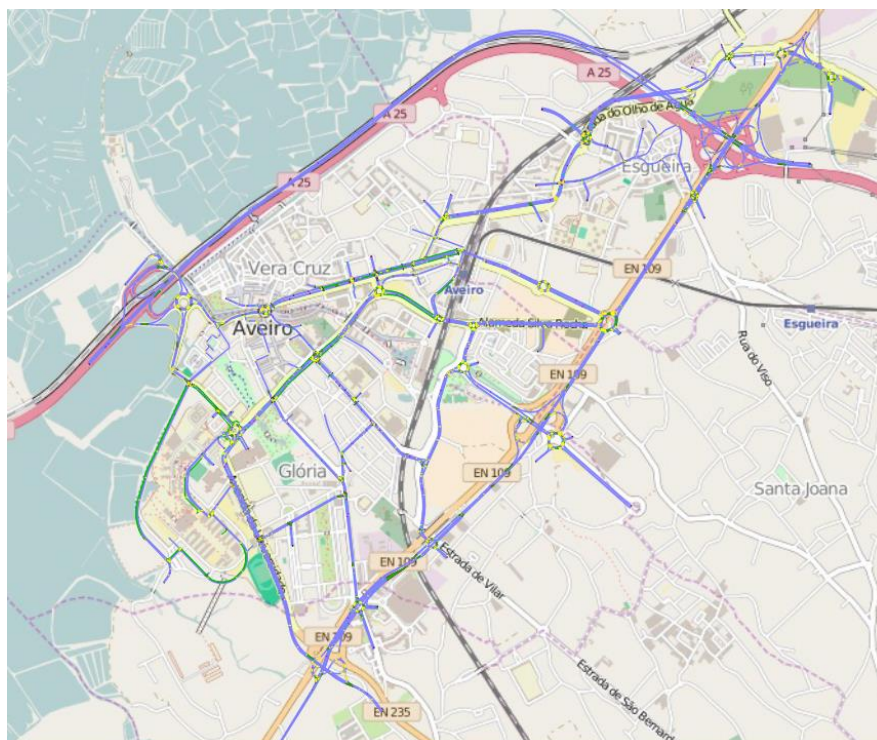


Figura 10 – Modelação da rede de Aveiro em VISSIM

Toda a calibração foi previamente efetuada e pode ser consultada em Bandeira *et al.* (2018). Como complemento apresento a Tabela 3 onde se podem ver os parâmetros de avaliação, testes e resultados da plataforma de simulação de tráfego e emissões em relação ao processo de validação sendo que GEH representa a fórmula para comparar dois volumes de tráfego (Geoffrey E. Havers) e RMSE (*root-mean-square error*) o erro de medida (Fontes *et al.*, 2014). Dados relativos ao modelo, tais como, volumes de tráfego, dinâmicas dos veículos e temporizações dos semáforos do modelo podem ser consultados em Bandeira *et al.* (2013), Bandeira *et al.* (2012) e Fontes *et al.* (2014).

Tabela 3 – Parâmetros de validação do VISSIM (Fonte: Bandeira *et al.* (2018))

Parâmetros de avaliação	Teste	Resultados
Volume de tráfego em 14 pontos da rede	GEH	0.2-1.2
	RMSE	<10%
Tempo de viagem em 10 segmentos	GEH	Max. 0.7, Min. 0.1, Med. 0.3
Velocidade média	GEH	Max. 0.6, Min. 0.1, Med. 0.2
Distribuição de modos VSP	Teste K-S	Não significativo para um IC de 95%
Emissões de CO <sub>2</sub>	Erro relativo (%)	Max. 8.2%, Min. 0,1%, Med. 2.7%
Emissões de CO	Erro relativo (%)	Max. 8.8%, Min. 0,7%, Med. 3.3%
Emissões de NOx	Erro relativo (%)	Max. 8.9%, Min. 1.3%, Med. 3.8%
Emissões de HC	Erro relativo (%)	Max. 8.6%, Min. 0,6%, Med. 2.8%

Para completar esta rede e de modo a analisar as capacidades dos CAV em zona urbana, foram realizadas algumas alterações na rede. Primeiramente considerou-se importante a introdução dos dados da passagem de peões nas passadeiras da Avenida Lourenço Peixinho e da Avenida 25 de Abril tendo em conta o sentido de circulação.

Para simular as passadeiras foram criadas duas vias com dois sentidos perpendiculares à rua principal e a atravessar a mesma. Após dada a ordem de prioridade dos peões, pois os veículos têm de ceder passagem aos peões, é inserido o valor da quantidade de peões que atravessa a passadeira por hora em cada sentido.

Para a Avenida Lourenço Peixinho os dados foram retirados da Dissertação de mestrado desenvolvida por Margarido (2013). São, assim, apresentados na Tabela 4 os valores das contagens de peões para esta avenida, efetuadas entre as 9.30h e as 10.30h, que foram complementadas com contagens adicionais - ver o Anexo A.

Tabela 4 – Contagem de peões que atravessam as passadeiras da Avenida Lourenço Peixinho

<b>Ponto</b>	<b>Passadeira</b>	<b>Sentido</b>	
		<b>N-S</b>	<b>S-N</b>
<b>21</b>	ourivesaria-fórum	85	121
<b>23</b>	Casa Alvarinho – Edifício Avenida	17	61
<b>26</b>	CTT	68	8
<b>27</b>	Adágio	96	64
<b>39</b>	CP	29	9

Para a Avenida 25 de Abril ainda não existiam contagens, tendo sido realizado trabalho de campo para contagem de peões para cada uma das passadeiras. Uma tabela é apresentada de seguida com os valores das contagens realizadas novamente para um período entre as 9.30h e as 10.30h (Tabela 5). Em anexo encontram-se tabelas e imagens referentes a cada uma das passadeiras de modo a melhor situar o leitor – Ver anexo B.

Tabela 5 – Contagem de peões que atravessam as passadeiras da Avenida 25 Abril

<b>Passadeira</b>	<b>Sentido</b>	
	<b>O-E</b>	<b>E-O</b>
1	61	72
2	20	19
3	21	32

De seguida, devido às diferenças de velocidade, bem como acelerações e travagens dos veículos pesados de passageiros relativamente aos veículos ligeiros e serem veículos propícios a criar congestionamento, foi também incluída na simulação a entrada destes veículos na rede. Assim, na Tabela 6 encontram-se os dados retirados do site Aveiro Bus usados para inserir no VISSIM.

Tabela 6 – Contagem dos autocarros que circulam nas avenidas principais da cidade de Aveiro entre as 8.00h e as 9.00h (Fonte: Aveiro Bus)

Via	Número de Autocarros por hora
Lourenço Peixinho	13
25 de Abril	4

A inserção destes veículos teve em conta o circuito percorrido por cada linha, informação também retirada do site da Aveiro Bus.

Após as alterações uma nova validação poderia ter sido efetuada. No entanto, devido à percentagem de veículos pesados inseridos na rede ser muito baixa em comparação com a dos restantes veículos e terem sido incluídas passeadeiras em apenas duas das avenidas de toda a rede, esta não foi considerada uma prioridade, tendo sido considerada suficiente a validação previamente realizada.

Após completa a modelação da rede de Aveiro, é necessário um ajuste dos parâmetros de condução dos CAV.

### 3.2.2 Modelação dos CAV – Parâmetros “car following”

É necessário que se tenha a noção de que em quase todos os modelos e *softwares* de simulação existem limitações na modelação de tráfego, principalmente quando se trata de replicar o comportamento dos condutores em situações reais do dia-a-dia. Deste modo, a representação do comportamento dos CAV não será completamente fiel ao seu comportamento real. Esta falha deve-se principalmente ao facto de não se conseguir simular o fator da comunicação entre veículos através dos VISSIM, sendo imprescindível o auxílio de programação externa para o conseguir. No entanto, para esta Dissertação o objetivo é simular o comportamento dos veículos autónomos a partir da alteração dos parâmetros do modelo de *car following* deixando questões de conectividade para trabalho futuro.

Apesar disso, de modo a trazer uma aproximação mais real à simulação, o VISSIM disponibiliza dois modelos de *car following* com possibilidade de alterar certos parâmetros representativos do comportamento de condução: o *Wiedemann 74*, mais usado em ambiente urbano, e o *Wiedemann 99*, utilizado para autoestrada (Habtemichael e Picado-Santos, 2013; Stogios, 2018)(Figura 11).

Como os valores padrão do VISSIM representam em geral uma boa aproximação do comportamento dos veículos convencionais (Fontes *et al.*, 2014), estes foram inalterados para os veículos em questão. De salientar que os veículos convencionais vão ter um comportamento diferente consoante a via em que circulam. Por exemplo, em autoestrada vão reger-se pelo modelo *Wiedmann 99* e dentro de cidade pelo modelo *Wiedmann 74*. O mesmo já não acontece com os veículos autónomos que se regem sempre pelo mesmo modelo que será explicado posteriormente.

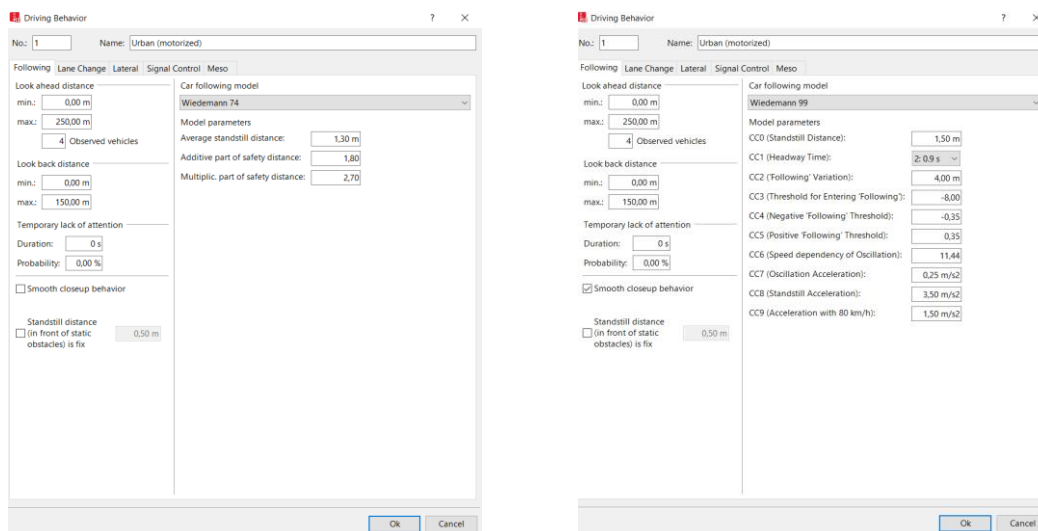


Figura 11 – Dados padrão do Wiedmann 74 (esquerda) e Wiedmann 99 (direita)

Assim, graças ao comportamento dos veículos autónomos ser diferente, é necessário atribuir um comportamento novo e diferente a estes veículos. Ao oferecer um maior conjunto de parâmetros para alterar, o *Wiedemann 99* torna-se o modelo mais adequado para os CAV graças à sua flexibilidade de ajuste da condução dos veículos (Stogios, 2018). Este apresenta um conjunto de 10 parâmetros, designados de CC0-CC9, que modificam aspetos de quatro modos de condução, a saber: a condução livre, aproximação a um veículo, seguimento de um veículo e travagem (Lownes e Machemehl, 2006; Zhao e Sun, 2013).

Cada um destes parâmetros representa uma característica única no comportamento do veículo. Os primeiros quatro parâmetros (CC0- CC3) são referentes à distância entre veículos,

os três seguintes (CC4-CC6) dizem respeito às velocidades de seguimento entre veículos, as acelerações são representadas por outros três parâmetros (CC7-CC9) e, finalmente, dois parâmetros referentes à mudança de faixa de rodagem (*Min. Headway* e *Safety Distance Reduction Factor*). De seguida é dada uma breve explicação de cada um dos parâmetros mais relevantes para esta Dissertação (Habtemichael e Picado-Santos, 2013):

- CC0 (*Stopped Condition Distance*) – representa a distância de paragem relativa ao veículo da frente ou mais concretamente o espaçamento que o condutor deseja manter em relação ao veículo da frente quando estes se encontram parados. Este parâmetro é usado no cálculo da distância de segurança juntamente com o parâmetro CC1 e, sendo uma distância, é representado em metros.
- CC1 (*Headway Time*) – é o fator que controla a velocidade referente à distância de segurança. Este é um fator que tem grande impacto na capacidade das estradas e é dado em segundos.
- CC3 (*Threshold for entering 'Following'*) – relativo ao momento em que o condutor começa a desacelerar até chegar à distância de segurança; expresso em segundos.
- CC4 e CC5 (*'Following' Thresholds*) – são os parâmetros que controlam a velocidade de seguimento em relação ao veículo da frente. Valores absolutos mais baixos significam uma maior capacidade de reação do condutor em relação a acelerações ou desacelerações do veículo da frente. Ambos os parâmetros são apresentados em metros/segundo.
- CC7 (*Oscillation Acceleration*) – é relativo à aceleração de oscilação, mais concretamente, a capacidade de aceleração em situações de congestionamento. É dado em  $m/s^2$  e valores mais altos representam uma condução mais agressiva.
- CC8 (*Standstill Acceleration*) – representa a capacidade de aceleração do veículo quando este se encontra parado. A unidade é  $m/s^2$ .
- CC9 (*Acceleration at 80 km/h*) – é a capacidade de aceleração do veículo quando este circula a 80 km/h, em  $m/s^2$ .



Também alguns parâmetros de mudança de faixa foram alterados, sendo esses:

- *Min. headway (front/rear)* – representa a distância mínima em relação ao veículo seguinte que tem que estar disponível antes de realizar a mudança de faixa a partir de um ponto de paragem.
- *Safety Distance Reduction Factor* – fator que tem em conta a presença dos veículos na outra faixa e reduz a própria distância de segurança até ser efetuada a mudança de faixa.

Após explicados cada um dos parâmetros que melhor caracterizam a condução autónoma foram escolhidos os parâmetros da Tabela 7. Estes valores foram devidamente estudados e calibrados previamente para zonas urbanas (Stogios, 2018). De referir que a otimização destes parâmetros é baseada em 400 combinações. Apesar de este estudo ter sido realizado no contexto norte-americano, dada a ausência de métodos de calibração no nosso contexto, considerou-se oportuno usar como referência estes valores e focar o trabalho na investigação da avaliação de diferentes taxas de penetração de CAV e no conseqüente desempenho destes veículos e dos veículos convencionais. Para que melhor se entenda o contexto em que estes parâmetros foram otimizados, embora seja considerado centro urbano, essas vias apresentam semelhanças com a estrada nacional 109.

Tabela 7 – Comparação dos parâmetros padrão do VISSIM e dos parâmetros dos CAV usados neste estudo; parâmetros identificados com um asterisco (\*) são referentes ao modelo de mudança de faixa

<b>Parâmetro</b>	<b>Valores padrão</b>	<b>CAV</b>
<b>CC0</b> [m]	1,50	1,47
<b>CC1</b> [s]	0,9	1
<b>CC3</b> [s]	-8,00	-13,54
<b>CC4</b> [m/s]	-0,35	-0,13
<b>CC5</b> [m/s]	0,35	0,13
<b>CC7</b> [m/s <sup>2</sup> ]	0,25	0,08
<b>CC8</b> [m/s <sup>2</sup> ]	3,50	3,72
<b>CC9</b> [m/s <sup>2</sup> ]	1,50	1,60
<b>Min. headway (front/rear)</b> [m] *	0,50	0,70
<b>Safety Distance Reduction Factor</b> *	0,60	0,21

Tendo sido escolhidos os valores que melhor caracterizam o comportamento dos CAV, foram então inseridos os valores no modelo de tráfego PTV VISSIM como é demonstrado pela Figura 12. Os limites de velocidade existentes na rede foram então adaptados para incluir todos os novos veículos introduzidos.

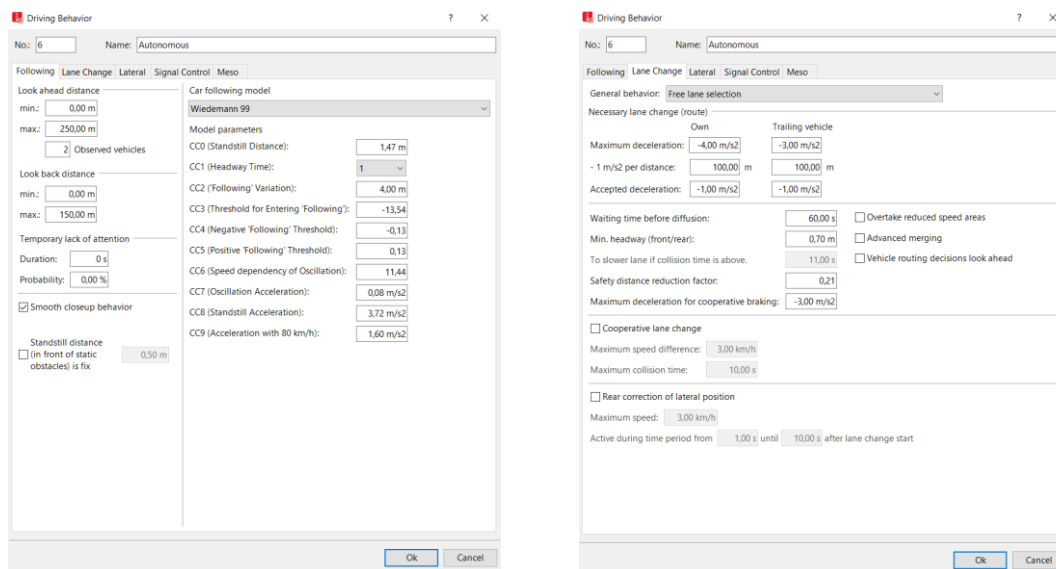


Figura 12 – Configuração do comportamento dos CAV

Impactes inesperados podem surgir com a introdução dos CAV tanto a níveis de emissões e consumos como também a nível da procura. Tendo em conta as condicionantes e objetivos deste estudo, os seguintes pressupostos foram considerados:

- Os CAV não afetam a procura de mobilidade nem a taxa de ocupação dos veículos em todos os cenários;
- Os CAV não circulam numa via dedicada, encontrando-se num regime misto com os veículos convencionais;
- Os CAV apresentam níveis de tecnologia de propulsão e de controlo de emissões semelhantes aos veículos convencionais;
- Os CAV têm por defeito padrões de aceleração otimizados para redução de consumos e emissões de acordo com a literatura;
- Os CAV não comunicam entre eles e com a infraestrutura. Contudo, dependendo da localização, em algumas vias podem adaptar a sua velocidade máxima para otimizar o consumo de energia.

### 3.2.3 Simulação no VISSIM

Após a definição dos parâmetros de microsimulação dos CAV, analisar-se-ão os cenários de simulação relativamente à taxa de penetração dos CAV na rede. Assim, para melhor visualização da influência destes, foram escolhidas cinco diferentes taxas de penetração. Foi realizado também um cenário base em que não existiam veículos autónomos para servir de comparação. Deste modo, foram realizadas 6 simulações com diferentes taxas de penetração de CAV: 0%, 10%, 30%, 50%, 70% e 90% designados de CB (Cenário Base (0%): rede apenas com veículos convencionais em circulação) C1, C2, C3, C4 e C5 respetivamente, sendo a percentagem referente à penetração de CAV na rede (exemplo: C1 – 90% de veículos convencionais e 10% de CAV).

Estes valores incidem nos valores iniciais do cenário base. Isto significa que, por exemplo ao serem acrescentados 10% de CAV na rede, são retirados os mesmos 10% aos veículos convencionais. Desta forma assume-se que os CAV não têm impacto ao nível da procura. Na Tabela 8, para uma melhor compreensão, são apresentados os valores da entrada de veículos em cada ponto da rede para cada um dos cenários.

Tabela 8 – Variação do número de veículos em cada entrada

Lin k	Cená rio Base	C1		C2		C3		C4		C5	
		Autó nomo s	Convencion ais	Autó nomo s	Convencion ais	Autó nomo s	Convencion ais	Autó nomo s	Convencion ais	Autó nomo s	Convencion ais
20	396	40	356	119	277	198	198	277	119	356	40
62	51	5	46	15	36	26	25	36	15	46	5
90	60	6	54	18	42	30	30	42	18	54	6
109	681	68	613	204	477	341	340	477	204	613	68
121	377	38	339	113	264	189	188	264	113	339	38
137	182	18	164	55	127	91	91	127	55	164	18
140	61	6	55	18	43	31	30	43	18	55	6
148	305	31	274	92	213	153	152	213	92	274	31
153	180	18	162	54	126	90	90	126	54	162	18
154	450	45	405	135	315	225	225	315	135	405	45
160	174	17	157	52	122	87	87	122	52	157	17
186	31	3	28	9	22	16	15	22	9	28	3
187	44	4	40	13	31	22	22	31	13	40	4
195	391	39	352	117	274	196	195	274	117	352	39
198	231	23	208	69	162	116	115	162	69	208	23
205	860	86	774	258	602	430	430	602	258	774	86
209	122	12	110	37	85	61	61	85	37	110	12
213	373	37	336	112	261	187	186	261	112	336	37

214	670	67	603	201	469	335	335	469	201	603	67
215	157	16	141	47	110	79	78	110	47	141	16
217	74	7	67	22	52	37	37	52	22	67	7
220	204	20	184	61	143	102	102	143	61	184	20
223	337	34	303	101	236	169	168	236	101	303	34
229	180	18	162	54	126	90	90	126	54	162	18
231	32	3	29	10	22	16	16	22	10	29	3
248	151	15	136	45	106	76	75	106	45	136	15
251	102	10	92	31	71	51	51	71	31	92	10
253	99	10	89	30	69	50	49	69	30	89	10
254	301	30	271	90	211	151	150	211	90	271	30
255	110	11	99	33	77	55	55	77	33	99	11
257	91	9	82	27	64	45	46	64	27	82	9
260	67	7	60	20	47	33	34	47	20	60	7
261	103	10	93	31	72	51	52	72	31	93	10
264	34	3	31	10	24	17	17	24	10	31	3
278	394	39	355	118	276	197	197	276	118	355	39
308	518	52	466	155	363	259	259	363	155	466	52
321	174	17	157	52	122	87	87	122	52	157	17
329	512	51	461	154	358	256	256	358	154	461	51
330	302	30	272	91	211	151	151	211	91	272	30
333	99	10	89	30	69	49	50	69	30	89	10
339	392	39	353	118	274	196	196	274	118	353	39
341	235	24	211	71	164	117	118	164	71	211	24
342	211	21	190	63	148	105	106	148	63	190	21
355	134	13	121	40	94	67	67	94	40	121	13
386	269	27	242	81	188	134	135	188	81	242	27
394	1055	106	949	317	738	527	528	738	317	949	106
398	958	96	862	287	671	479	479	671	287	862	96
403	143	14	129	43	100	71	72	100	43	129	14
404	704	70	634	211	493	352	352	493	211	634	70
419	342	34	308	103	239	171	171	239	103	308	34
425	724	72	652	217	507	362	362	507	217	652	72
435	362	36	326	109	253	181	181	253	109	326	36
598	103	10	93	31	72	51	52	72	31	93	10

No que diz respeito à configuração da simulação, em termos de resolução foi usado o valor padrão de 10 passos de tempo/segundo de simulação. Estes passos de tempo, como a simulação opera segundo a segundo, garantem que os dados de saída são registados com esse intervalo.

As simulações foram realizadas para períodos de 5400 segundos. Durante os primeiros 1800 segundos não seriam recolhidos dados de modo a esperar o aquecimento da rede, após os quais são realizados 3600 segundos de simulação com recolha dos dados pretendidos. Este aquecimento da rede é essencial para estabilizar o tráfego ao longo da rede.

Para cada cenário foram feitas 10 simulações aleatórias de modo a refletir a natureza estocástica do tráfego. Refira-se que em cada simulação foi atribuída uma *seed* de 1 a 10, e que estes valores foram igualmente atribuídos nos cenários avaliados. Na Figura 13 podemos observar os parâmetros de simulação para um exemplo com uma aleatoriedade de 10.

The image shows a 'Simulation parameters' dialog box with the following settings:

- Comment: (empty text box)
- Period: 5400 Simulation seconds
- Start time: 00:00:00 [hh:mm:ss]
- Start date: [DD.MM.YYYY]
- Simulation resolution: 10 Time step(s) / Sim. sec.
- Random Seed: 10
- Number of runs: 1
- Random seed increment: 1
- Dynamic assignment volume increment: 0.00 %
- Simulation speed:  maximum,  3.0 Sim. sec. / s,  retrospective synchronization
- Break at: 0 Simulation seconds
- Number of cores: use all cores

Figura 13 – Parâmetros da simulação

### 3.2.4 Extração de Dados do VISSIM

Ao longo da simulação é possível observar e verificar alguns dados diretamente no VISSIM. No entanto, para fazer uma análise completa é necessário a criação de uma base de dados. Na secção de *Evaluation Configuration* é possível escolher todo o tipo de recolha de dados pretendido. Para este estudo os parâmetros importantes a recolher seriam relativos aos *links*, à contagem de filas de espera (congestionamento) e ao tempo de viagem dos veículos como visível na Figura 14.

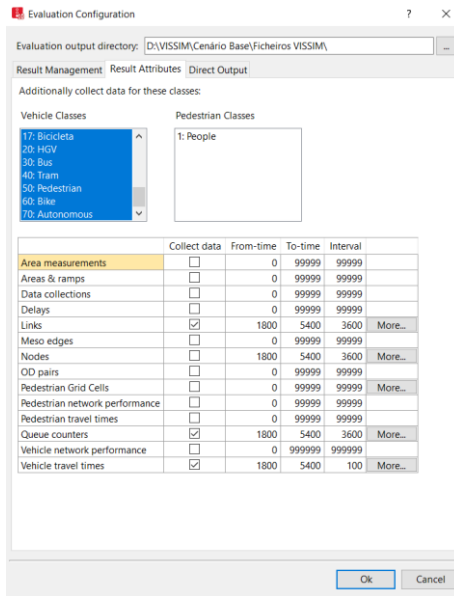


Figura 14 – Configuração da base de dados

Também nesta secção, no menu *Direct Output*, é seleccionada a informação que se pretende exportar do VISSIM para a base de dados (Figura 15). Deste modo após seleccionar o *Write database* para a recolha de dados relativa aos veículos, são seleccionados todos os valores pretendidos que vão ser extraídos e agrupados numa tabela para posterior tratamento de dados (Figura 16).

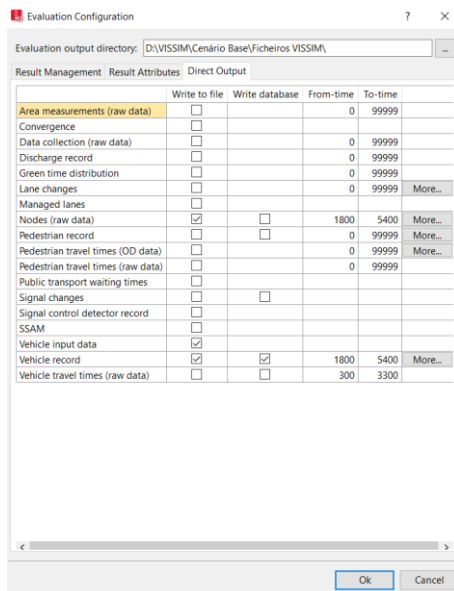


Figura 15 – Configuração da recolha de dados

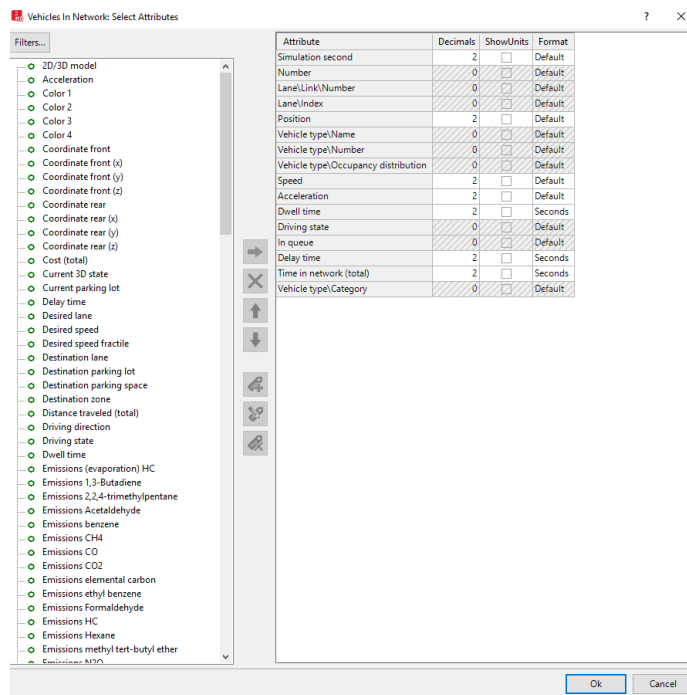


Figura 16 – Escolha de atributos para base de dados

Após a escolha de todos os valores a inserir na base de dados é iniciada a simulação. Como referido anteriormente, a partir dos 1800 segundos de simulação dá-se início à recolha de dados. Esta recolha é feita com a criação de uma base de dados em *Access* através de uma extensão (*Microsoft Access Database Engine 2016*) instalada de modo a permitir que o VISSIM consiga criar a base de dados. Assim, através da ferramenta “*Create New Access Database*”, o VISSIM exporta os dados para o *Access* (Figura 17).

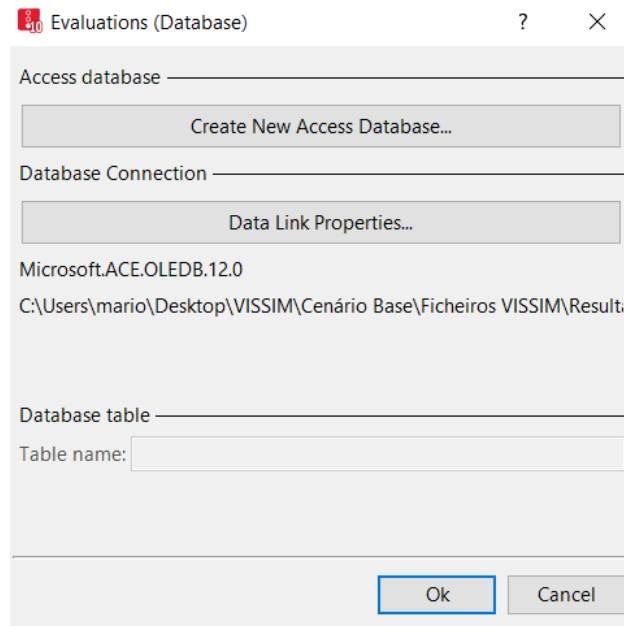


Figura 17 – Criação de base de dados

A base de dados criada é posteriormente analisada no *Access*. Devido à grande quantidade de dados retirados (mais de 2 milhões de linhas de valores para cada *seed*), é necessária a seleção dos *links* referentes a cada troço antes da exportação para folhas de cálculo (*MS Excel*), usadas para a análise de dados devido a ser um programa mais amigável do utilizador que o *Access* e, deste modo, mais fácil de usar. Na Tabela 9 são apresentados os *links* correspondentes a cada um dos troços, bem como a respetiva distância em metros.



Tabela 9 – Links correspondentes a cada troço escolhido

N 109				Av. 25 de Abril		A25		Av. Lourenço P.	
nº	d (m)	nº	d (m)	nº	d (m)	nº	d (m)	nº	d (m)
26	478,95	68	174,37	156	94,50	20	2574,94	125	209,75
27	48,00	74	221,10	158	15,71	21	2579,41	133	769,63
28	164,68	109	238,44	281	114,64	22	126,80	427	204,59
29	504,29	128	37,46	282	60,26	23	982,41	429	178,61
30	258,21	162	109,56	284	54,63	71	252,57	430	177,50
31	277,53	163	70,78	368	24,59	72	206,75	431	2,66
32	1051,13	164	524,97	369	172,67	175	560,94	438	506,46
33	468,11	177	55,51	370	246,16	176	152,31	439	33,74
34	121,73	178	552,67	373	158,91	181	55,21		
35	111,26	179	53,53	374	131,56	182	47,21		
54	224,14	180	67,08	375	39,75	404	161,56		
55	177,93	259	581,00	376	93,02	405	180,74		
56	139,05	384	106,89						
58	72,33	385	255,78						
63	573,54	398	432,76						

Como referido, todos os dados são analisados em *Excel*. De modo a efetuar a exportação apenas dos *links* pretendidos é feita uma seleção prévia. Esta seleção é realizada com a criação de uma consulta no *Access* com auxílio de um código SQL. Este código permite selecionar apenas os dados com os veículos e os *links* pertencentes a cada troço. Isto permite obter, de modo mais eficiente, os dados relevantes para o caso de estudo. Um exemplo do código utilizado para a A25 é apresentado no Anexo C.

Após a criação da consulta com os dados relevantes é então feita a extração desses dados para o *Excel*. Depois de extraídos é então aplicada a metodologia VSP (*vehicle specific power*) para cálculo das emissões.

### 3.3 Metodologia VSP

A metodologia VSP, que permite a microssimulação das emissões dos veículos com base na potência específica instantânea do veículo, é usada para calcular as emissões de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> e HC, e, deste modo, avaliar os impactos de vários cenários de tráfego como turbo-rotundas ou vias para veículos de ocupação elevada (HVO, *High Occupancy Vehicles*) e eco vias (dedicadas a veículos de combustível alternativo) (Fernandes *et al.*, 2017; Fernandes, Roupail e Coelho, 2017; Fontes *et al.*, 2014; Zaroff *et al.*, 2000).

Como modelo de cálculo das emissões o VSP caracteriza-se por ser uma metodologia microscópica, pois estima os consumos e emissões instantâneas (Frey, Zhang e Roupail, 2010). Sendo sensível a alterações nos padrões de aceleração é bastante útil para os cálculos de emissões em zonas urbanas. Este modelo tem por base a potência específica do veículo (ver equação 1) que serve para cálculo do consumo de combustível e emissões dos veículos (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, CO e HC). Os valores de VSP variam entre -50 kW/ton e 50 kW/ton e dependem de vários fatores como aerodinâmica, atrito, inclinação da estrada e energia cinética.

$$VSP = v[1.1a + 9.81 \times \sin \times (\arctan(\text{declive})) + 0.132] + 0.000302v^3$$

Equação 1 - Cálculo do VSP

- VSP – Potência específica do veículo (kW/ton);
- $v$  – Velocidade instantânea (m/s);
- $a$  – Aceleração instantânea (m/s<sup>2</sup>);
- $\text{declive}$  – Inclinação instantânea da estrada ( $\pm\%$ ).

A equação 2 é usada para o cálculo das emissões totais através de uma soma de todos os tempos gastos em cada modo VSP multiplicados pela taxa de emissão para cada poluente.

$$E_i = \sum_i^{14} FE_{ij} \times t_{ij}$$

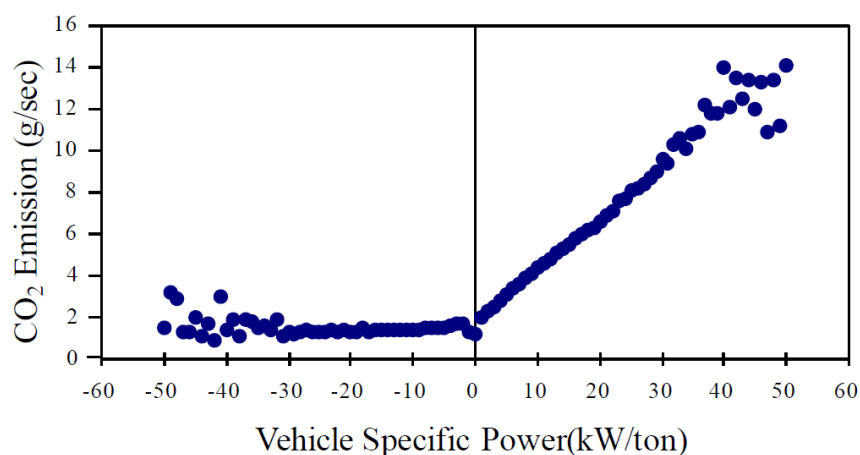
Equação 2 - Total de emissões de cada poluente

- $E_i$  – Total das emissões do poluente  $i$  gerado em cada teste (g);
- $FE_{ij}$  – Fator de emissão para a fonte de poluente  $i$  (NO<sub>x</sub> e CO<sub>2</sub>) para o modo VSP  $j$  (1, 2, 3 ... 14) (g / s);
- $t_{ij}$  – Tempo gasto no modo VSP  $j$  em cada série (s).

Para a calibração da metodologia VSP, foi adaptada, tanto quanto possível, a taxa de emissões à frota portuguesa, utilizando cinco veículos de diferentes tipos, sendo estes: 39% (1.4L 33% + 1.8L 5.95% + 2.2L 0.05%) de veículos ligeiros a gasolina, 40% de veículos ligeiros a diesel (1.9L) e 21% de veículos comerciais ligeiros a diesel (2.5L) (Fernandes *et al.*, 2018).

No que diz respeito ao gradiente de inclinação da via, já que o relevo da cidade de Aveiro não é relevante, este valor será considerado de zero. Com o objetivo de mostrar a relação entre a emissão de cada poluente, neste caso o CO<sub>2</sub> e o NOx, em gramas por segundo, e o valor do VSP são, de seguida, apresentados dois gráficos disponibilizados pela NSCU 2002 para veículos a gasolina (Frey e Roupail, 2010).

a)



b)

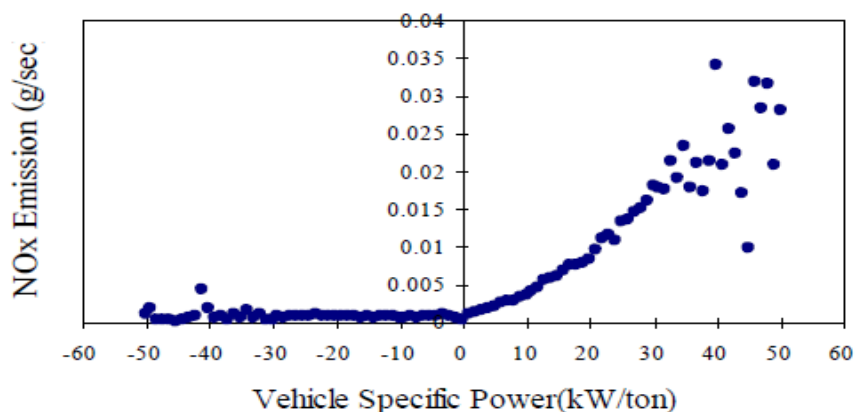


Figura 18 – Relação entre valores VSP e emissões de a) CO<sub>2</sub> e de b) NOx (Fonte: NSCU 2002)

Destes gráficos pode-se observar que para valores negativos de VSP as emissões tendem a ser relativamente baixas, aumentando gradualmente para valores VSP positivos até atingir aproximadamente 45, a partir do qual parece haver uma diminuição.

Após cálculo da potência específica do veículo segundo a segundo é necessário um enquadramento dos valores de -50 a 50 em modos. Assim, as taxas de emissões e consumos de combustível encontram-se categorizadas em 14 modos que definem a taxa de emissão média. Cada um destes 14 modos tem que ser estatisticamente diferente face aos outros. Este agrupamento é visível na Tabela 10.

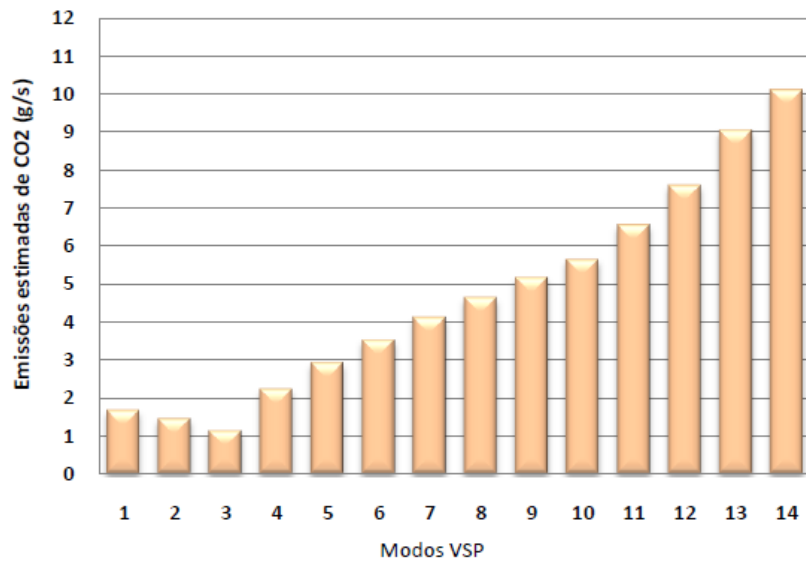
Tabela 10 – Modos VSP (Fonte: NSCU 2002)

<b>MODO VSP</b>	<b>INTERVALO</b>
<b>1</b>	$VSP < -2$
<b>2</b>	$-2 \leq VSP < 0$
<b>3</b>	$0 \leq VSP < 1$
<b>4</b>	$1 \leq VSP < 4$
<b>5</b>	$4 \leq VSP < 7$
<b>6</b>	$7 \leq VSP < 10$
<b>7</b>	$10 \leq VSP < 13$
<b>8</b>	$13 \leq VSP < 16$
<b>9</b>	$16 \leq VSP < 19$
<b>10</b>	$19 \leq VSP < 23$
<b>11</b>	$23 \leq VSP < 28$
<b>12</b>	$28 \leq VSP < 33$
<b>13</b>	$33 \leq VSP < 39$
<b>14</b>	$39 \leq VSP$

O primeiro grupo (modos VSP 1 a 3) corresponde a situações de desacelerações e acelerações e situações de para-arranca, o segundo grupo (modos VSP 4 a 6) representa acelerações e desacelerações até o veículo chegar à sua velocidade cruzeiro e, finalmente, o último grupo (modos VSP 7 a 14) representa acelerações mais intensas (Almeida, 2010; Frey *et al.*, 2002; Teixeira, 2016).

Por último, é possível estimar uma taxa de emissão média modal para cada um dos poluentes considerados, organizados ao longo dos 14 modos VSP. Estas estimativas são apresentadas na Figura 19 para veículos a gasolina.

a)



b)

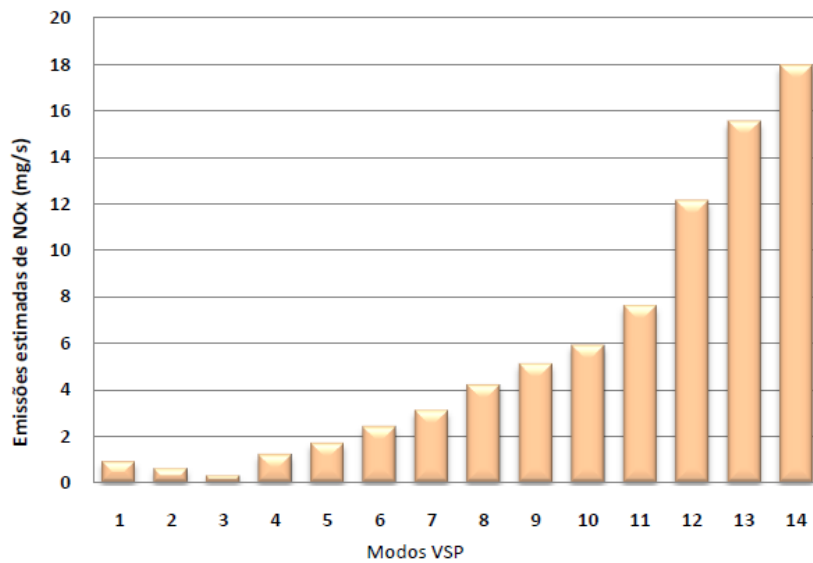


Figura 19 – Taxas de emissão média modal para a) CO<sub>2</sub> em g/s e b) NO<sub>x</sub> em mg/s numa viatura a gasolina com cilindrada inferior a 3,5L (Fonte: NSCU 2002)

Pela observação gráfica é possível concluir que as taxas de emissão modal são bastante diferentes para os dois poluentes, mas comportam-se de maneira semelhante. Os dois primeiros modos apresentam taxas de emissão superiores à do modo 3 e regista-se um aumento de emissões a partir do modo VSP 4 até ao 14.

Também para veículos a diesel foram realizadas estimativas por Coelho *et al.* (2009) e são apresentadas na figura seguinte.

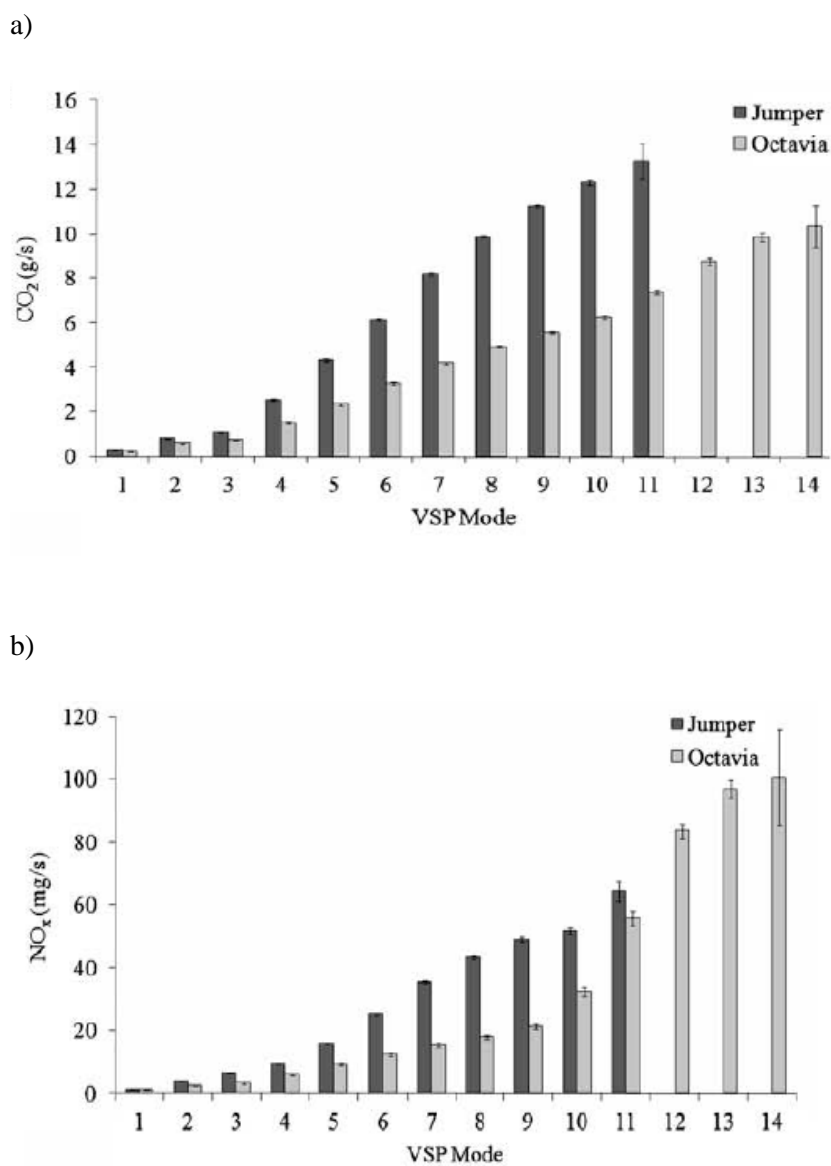


Figura 20 – Comparação entre taxas de emissão média modal para a) CO<sub>2</sub> em g/s e b) NO<sub>x</sub> em mg/s para os veículos ligeiros a diesel EURO II Citroen Jumper 2.5D e EURO III Skoda Octavia TDI 1.9

Como observável, não existem valores para os modos 12 a 14 para a Jumper. Isto deveu-se a não terem sido registados valores de VSP superiores a 28 KW/ton. Para a Octavia, o modo VSP 14 apresenta um desvio padrão elevado devido ao tamanho pequeno da amostra. No

entanto, é possível observar que, ao contrário dos veículos a gasolina, existe uma crescente taxa média de emissões logo a partir do modo VSP 1.

De modo a enquadrar esta Dissertação, a avaliação das emissões dos poluentes deve ser realizada considerando cada um dos dois poluentes em estudo de forma individual para cada um dos troços estudados. Deste modo, foi aplicada esta metodologia aos ficheiros *Excel* extraídos do *Access*, como referido anteriormente, de maneira a fazer uma análise dos resultados e uma posterior discussão dos mesmos.

## 4. Discussão de Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos e também será realizada uma comparação entre o cenário base, e os outros 5 cenários estudados, ao nível dos seguintes parâmetros: emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, distribuições dos modos VSP, velocidades médias e fluxo de veículos nos segmentos estudados.

### 4.1 Análise por troço

Numa primeira fase, vão ser comparados os valores obtidos para cada troço, de modo a avaliar o comportamento dos CAV em cada situação. A influência dos CAV nos veículos convencionais será também avaliada, bem como a situação inversa.

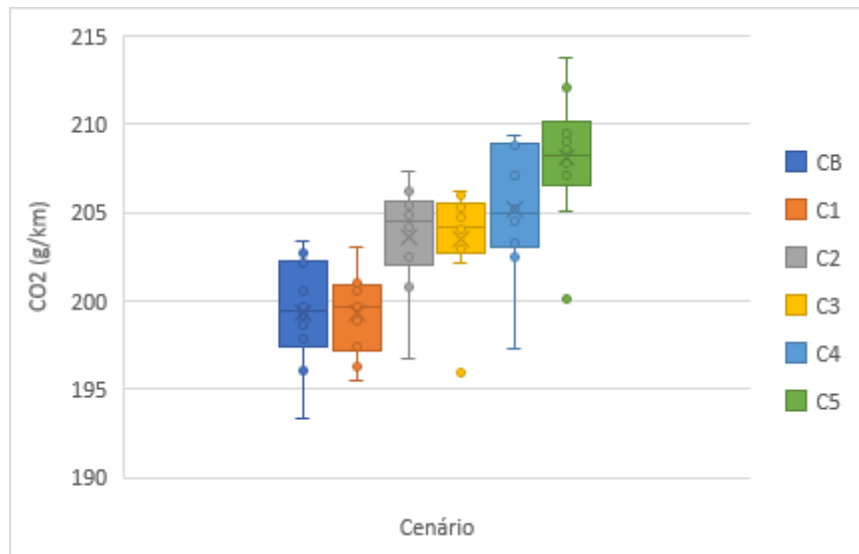
#### 4.1.1 Avenida Lourenço Peixinho

A Avenida Lourenço Peixinho caracteriza-se por ser uma zona de potencial para-arranca em função da presença de peões, sinalizações luminosas, outras interseções, tráfego automóvel por vezes intenso e velocidade limite de 50 km/h. Devido a estes fatores poderá existir um nível de emissões mais elevado.

Na Figura 21 é apresentada uma comparação entre os valores de emissões de CO<sub>2</sub> e de NO<sub>x</sub> para cada um dos diferentes cenários estudados. Estes gráficos representam a variabilidade dos resultados das várias *seeds* em função do VISSIM apresentar um parâmetro de estocacidade. Para que melhor sejam entendidos os resultados obtidos, uma breve explicação dos gráficos *Box-Plot* (diagramas de extremos e quartis ou diagrama de caixa) é necessária (Figura 22). A mediana é representada pela linha horizontal no interior da caixa. O “x” representa o valor médio dos dados e encontra-se normalmente perto da mediana e também no interior da caixa. A caixa simboliza 50% dos dados e os segmentos de reta verticais os outros 50%. Os valores máximo e mínimo são apresentados pelo traço horizontal no final de cada segmento de reta vertical. Para uma análise rápida, quanto mais esticada se encontrar a caixa e os extremos, maior é a dispersão de resultados. Para uma melhor visualização são feitas alterações nas escalas dos gráficos às quais o leitor deve prestar uma especial atenção.



a)



b)

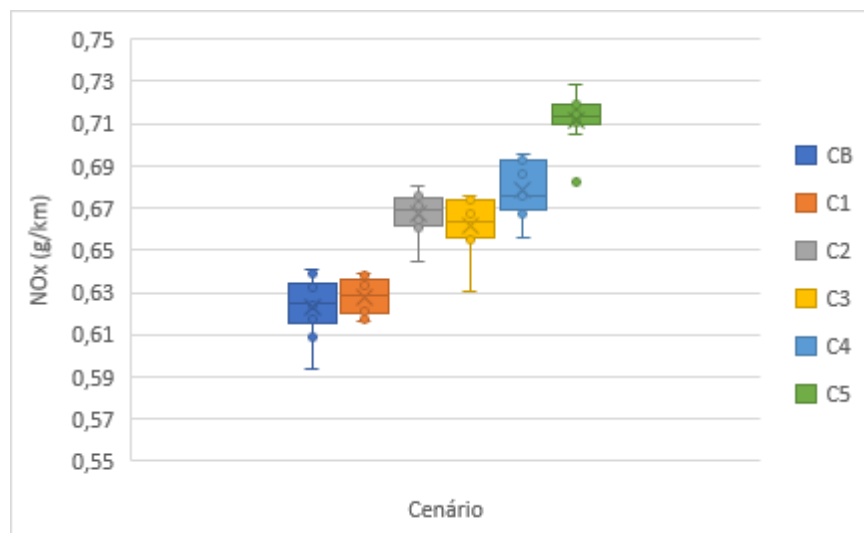


Figura 21 – Comparação das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> em g/km para cada cenário na Avenida Lourenço Peixinho

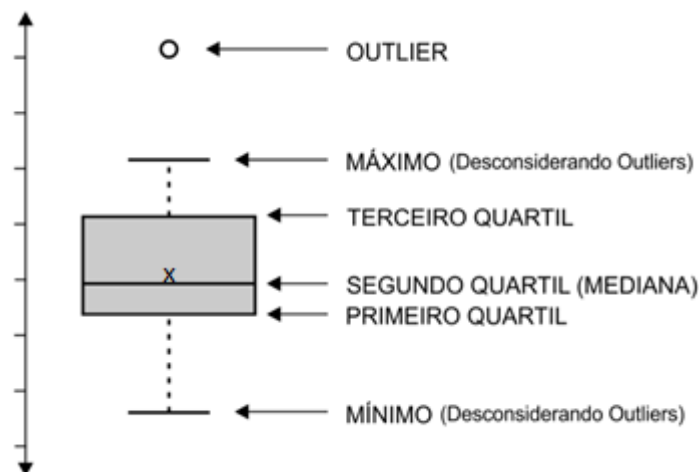


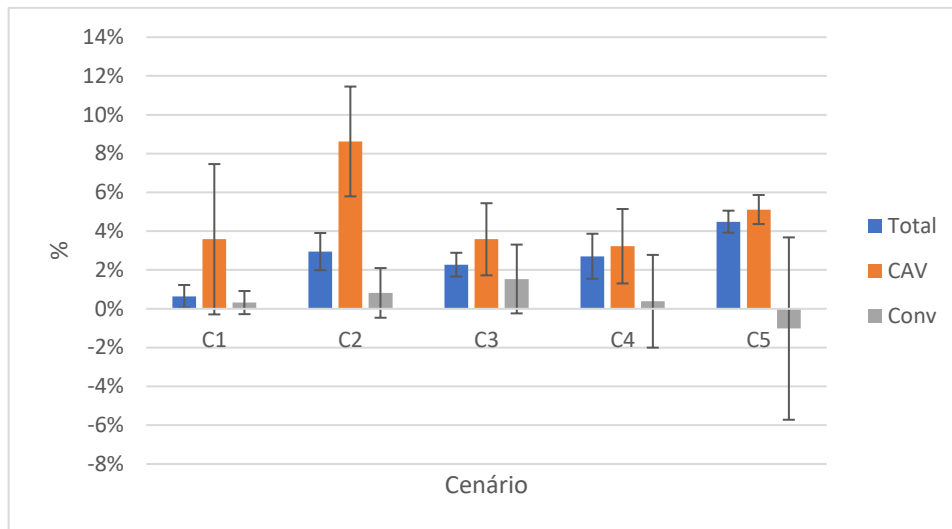
Figura 22 – Diagrama de Caixa (Fonte: AGB Consultoria Estatística)

Continuando agora com uma análise mais pormenorizada da Figura 21 a), destaca-se que o cenário com uma variação de valores maior é o cenário C4 onde existe uma variação de 12 g/km correspondentes a uma dispersão de 5% dos valores. De notar que o maior diferencial de emissões entre cenários ocorre entre os cenários C1 e C2 com um aumento de 5 g/km. Depois deste diferencial significativo, ocorre uma estabilização até ao cenário C4 onde não existem grandes alterações na média das emissões para estas taxas de penetração de CAV, no entanto, um ligeiro aumento destas é observável. De um modo geral existe um aumento gradual com a penetração dos CAV havendo um diferencial entre as emissões do cenário CB e C5 de 10 g/km.

Para as emissões de NO<sub>x</sub> a Figura 21 b) mostra, como referido, um gráfico de comparação das emissões para cada um dos cenários. Nela pode-se verificar que, ao contrário do gráfico do CO<sub>2</sub>, para este poluente a maior variação de valores ocorre para o cenário CB. Este poluente apresenta um comportamento muito semelhante ao CO<sub>2</sub>. Assim, tal como antes, existe um aumento de emissões com o aumento da taxa de penetração de CAV. Novamente, são visíveis poucas diferenças entre o valor médio de emissões para os cenários C2 a C4. Também aqui, o maior diferencial entre cenários ocorre entre os cenários C1 e C2. No entanto, apresentam valores de variação um pouco menores do que para o CO<sub>2</sub> e um aumento relativamente maior em relação ao cenário CB. O diferencial de emissões entre os cenários CB e C5 é de 0,1 g/km que corresponde a um aumento de 15% nas emissões totais de NO<sub>x</sub>, como observável pela Figura 23 b) que faz uma comparação percentual entre os cenários com CAV e o cenário CB.

De seguida é apresentada a comparação percentual de emissões de CO<sub>2</sub> (Figura 23 a)) e NO<sub>x</sub> (Figura 23 b)) dos cenários com CAV (C1, C2, C3, C4 e C5) em relação ao cenário base (CB) tendo em conta a tipologia do veículo.

a)



b)

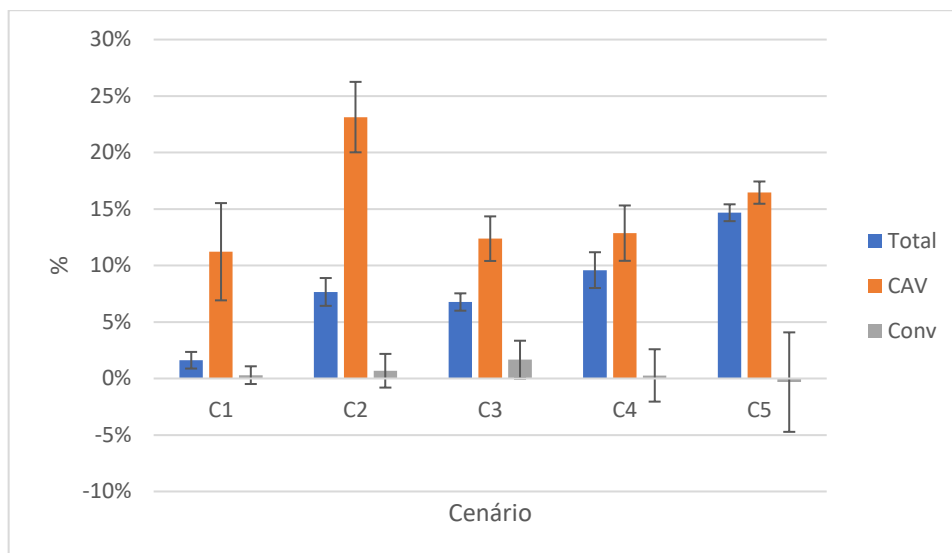


Figura 23 – Comparação percentual das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na Avenida Lourenço Peixinho

Com a observação do gráfico é possível uma confirmação dos dados anteriormente apresentados e analisados relativos ao aumento das emissões totais de CO<sub>2</sub>. Os desvios padrão mais elevados acontecem para os veículos com menor representação, isto é, ocorrem no cenário C1 para os CAV, que representam 10% dos veículos totais em circulação, e ocorre no cenário C5 para os veículos convencionais, que mais uma vez representam apenas 10% dos veículos

totais. Isto pode dever-se à influência que uns têm sobre os outros em termos comportamentais, destacando-se que os veículos em maior número facilmente influenciam o comportamento dos outros. Ao analisar as percentagens, o valor de 9% para os CAV para o cenário C2 destaca-se bastante dos outros. Este facto será explicado mais à frente, mas desde já fica claro que o diferencial anteriormente observado entre os cenários C1 e C2 é originado unicamente pelos CAV. Ao longo dos cenários é visível uma irregularidade no comportamento dos CAV, apresentando aumentos de emissões até ao cenário C2, diminuições até ao cenário C4 e um novo aumento para o cenário C5. Para algumas simulações obteve-se uma diminuição de CO<sub>2</sub> para os veículos convencionais sendo esse resultado claramente visível no cenário C5. Novamente estes veículos apresentam uma irregularidade no seu comportamento a nível de emissões ao longo dos cenários. Uma explicação para esta ocorrência pode ser o número de para-arrancas ser diferente consoante a percentagem de CAV introduzidos na rede. De um modo geral os aumentos anteriormente referidos entre os cenários CB e C5 correspondem a 4% de aumento de emissões de CO<sub>2</sub>.

Ao fazer uma análise para o comportamento dos CAV relativa à sua contribuição para o aumento das emissões, conclui-se que se pode dever ao parâmetro CC8 ser mais elevado pois existe muito congestionamento devido à sinalização luminosa e interseções. Como referido anteriormente, este fator representa a aceleração do veículo a partir de uma situação de paragem. Quanto mais paragens houver ao longo do troço, mais clara vai ser a influência deste parâmetro a nível de emissões.

Mais uma vez, por estes gráficos é visível a semelhança de comportamento dos dois poluentes. Para o NOx o desvio padrão torna a ser mais elevado para os CAV para o cenário C1 e para os veículos convencionais no cenário C5. O aumento das emissões totais ao longo dos cenários é também aqui visível. Este aumento é devido ao aumento da percentagem de CAV em circulação. Estes apresentam sempre emissões mais elevadas que os convencionais logo uma maior percentagem de CAV em circulação implica diretamente uma maior quantidade de emissões. Existe um pico para as emissões dos CAV no cenário C2 tal como acontece para o CO<sub>2</sub>. Isto pode ser explicado pela Figura 24 onde se pode ver um número superior de modos 12 a 14 do que nos outros cenários. O significado destes modos será explicado posteriormente.

A Figura 24 compara a percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo VSP e a distribuição dos modos de VSP entre dois veículos. Estes gráficos permitem relacionar os modos VSP com as emissões de cada veículo e deste modo tirar conclusões relativas às características das vias em que circulam e as diferenças de emissões entre os dois veículos.

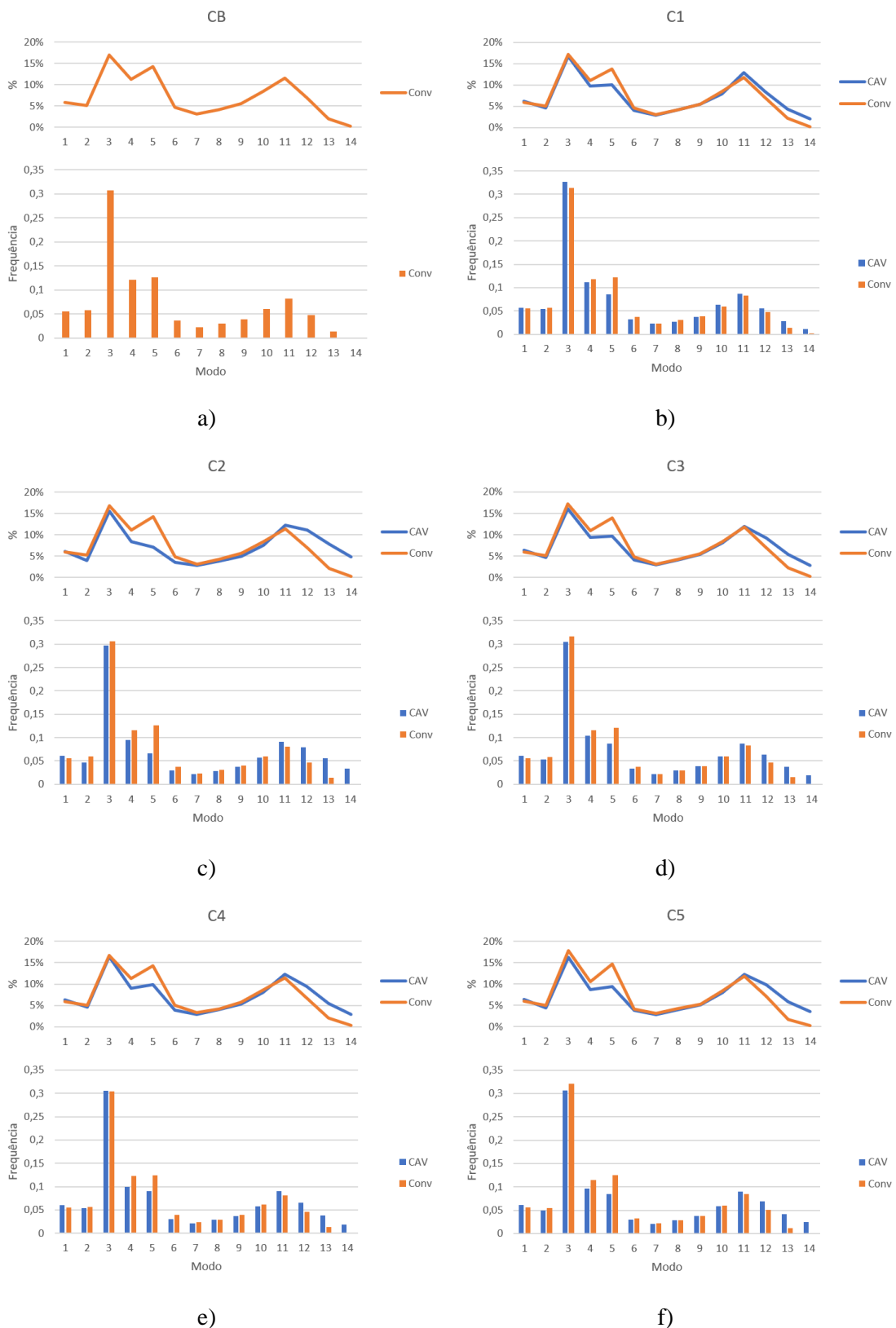


Figura 24 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na Avenida Lourenço Peixinho

Ao longo dos cenários não se verifica uma alteração de comportamento significativa para nenhum dos veículos tirando os modos VSP 4, 5, 11, 12, 13 e 14. Os CAV apresentam um menor número de modos VSP 4 e 5 e um número relativamente superior de modos VSP 11 a 14. A maior ocorrência destes últimos para os CAV justifica a diferença de emissões verificada. Estes modos são representativos de acelerações fortes, velocidades elevadas ou inclinações consideráveis. Neste caso não existe inclinação de estrada e as velocidades não ultrapassam os 50 km/h levando à conclusão que se deve a fortes acelerações. Pode ser explicado pelo parâmetro CC8 dos CAV ser mais elevado. Este parâmetro, como referido anteriormente corresponde à aceleração após uma paragem até à velocidade de cruzeiro o que leva a que os CAV tenham acelerações mais agressivas do que os convencionais. Assim, os modos VSP 11 a 13 representam acelerações fortes abaixo dos 40 km/h e o modo VSP 14 representa acelerações fortes entre os 40 km/h e os 50 km/h.

Existe também um aumento do número de veículos a circular ao longo dos cenários. Embora não seja uma diferença significativa existe um aumento de veículos de 2% para o cenário C1, baixando um pouco para o resto dos cenários, estabilizando para um aumento ligeiro de 1%. O aumento do número de veículos ajuda na contribuição para o aumento das emissões de CO<sub>2</sub> pois, embora possa não aumentar o número de para-arranca, leva a um aumento do congestionamento e consequentemente das emissões. O aumento da quantidade de veículos a circular ao longo do troço pode ser explicado pelos fatores CC0 e CC1, que representam a distância de segurança para o veículo da frente. Uma vez que o valor destes parâmetros é menor, a densidade de tráfego aumenta (número de veículos por quilómetro) e, por conseguinte, o número de veículos em circulação acaba por aumentar afetando, ainda que ligeiramente, o fluxo de veículos na zona estudada e no período de análise.

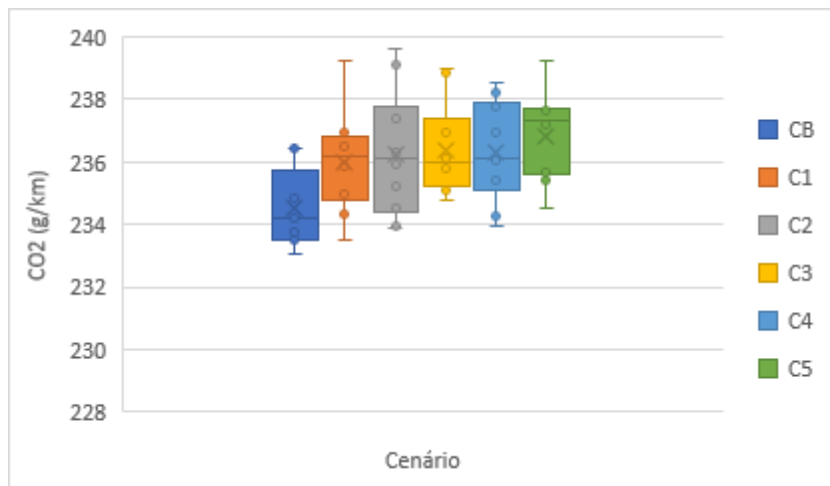
Fazendo uma análise geral para este troço, o comportamento dos CAV com acelerações mais agressivas que os convencionais geram um aumento das emissões de CO<sub>2</sub> e, principalmente, de NOx com o aumento da taxa de penetração dos mesmos. Os parâmetros usados não são os indicados para grandes congestionamentos e elevados números de para-arranca. O aumento do fluxo de veículos para este troço, embora pequeno, não é positivo visto que aumenta o congestionamento.

### 4.1.2 Avenida 25 de Abril

Tal como a Avenida Lourenço Peixinho, a Avenida 25 de Abril caracteriza-se por ser uma zona de escolas e residencial que tem potenciais para-arrancas em função da presença de peões, sinalização luminosa, algumas intersecções, tráfego automóvel intenso e velocidade limite de 50 km/h podendo, também, dar origem a níveis de emissões elevados.

Uma análise semelhante à feita para a Avenida Lourenço Peixinho vai ser realizada para este troço, começando pela Figura 25 onde é possível comparar as emissões de CO<sub>2</sub> e NOx para cada um dos cenários.

a)



b)

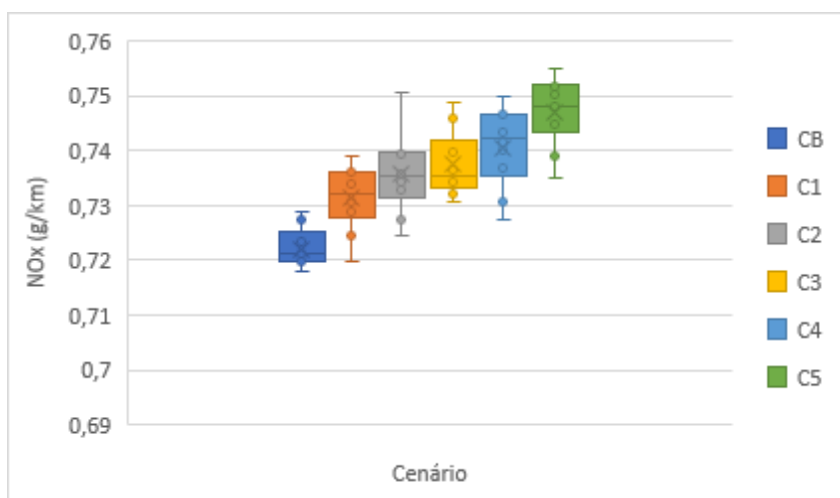


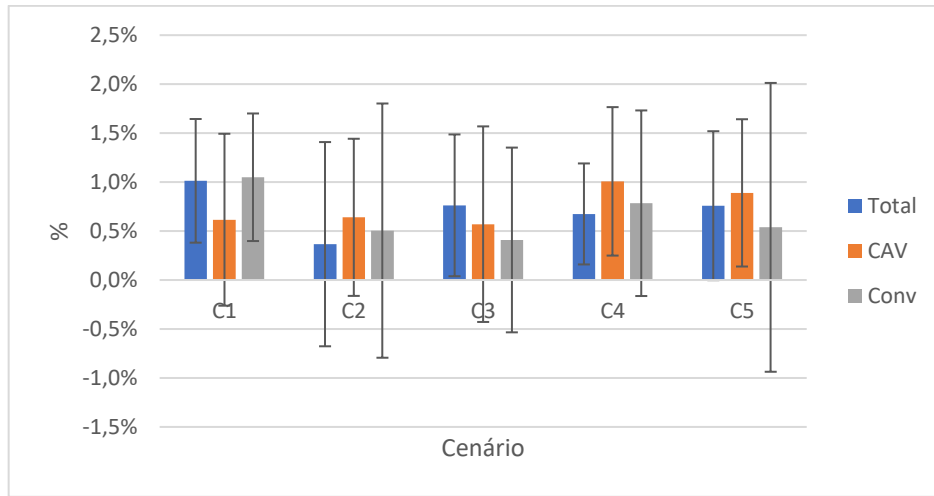
Figura 25 – Comparação das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> em g/km para cada cenário na Avenida 25 de Abril

Para este troço a variação de valores entre cada cenário é relativamente mais baixa do que para a Avenida Lourenço Peixinho. Estes desvios mais baixos podem dever-se à existência de menor quantidade de para-arrancas. É de notar um ligeiro aumento das emissões de CO<sub>2</sub> ao longo dos cenários correspondente a um aumento de 2 g/km entre o cenário CB e C5. Como tal, é um valor insignificante para os 235 g/km totais levando a concluir que neste troço a inserção de CAV não traz benefícios nem desvantagens em termos de emissões de CO<sub>2</sub>.

Para o NOx é visível um ligeiro aumento de emissões ao longo dos cenários. Para este poluente é observável um comportamento um pouco diferente do que ocorreu para o CO<sub>2</sub> visto que aumenta ao longo dos cenários. A variação de valores do cenário C2 é maior do que a dos outros cenários. O valor da diferença entre os cenários CB e C5 é de 0,02 g/km que corresponde a um valor de aumento de aproximadamente 3% como visível no gráfico da Figura 26 b).



a)



b)

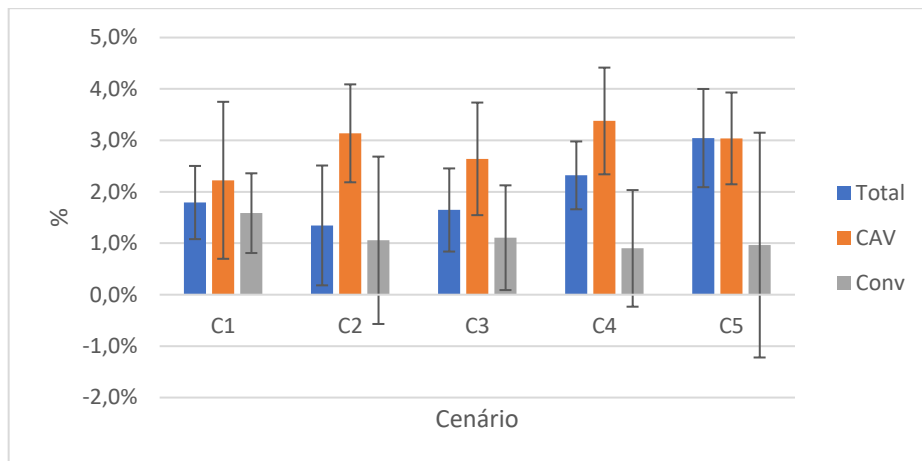


Figura 26 – Comparação percentual das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na Avenida 25 de Abril

Pela Figura 26 a), que compara as emissões de CO<sub>2</sub> a nível percentual entre os cenários, é novamente observável que ao longo nos cenários não existem aumentos significativos de emissões totais. De notar, o comportamento assimétrico das emissões dos CAV e dos veículos convencionais mostrando, mais uma vez, a influência que existe no comportamento de uns sobre os outros. Logo a partir do valor mais baixo de penetração dos CAV existe um aumento das emissões totais sendo esse valor abaixo do 1% ao longo dos cenários. Neste gráfico são visíveis desvios padrão elevados face ao valor médio para todos os cenários e veículos. Embora elevados correspondem a desvios máximos de 1,5% sendo, perante o valor elevado de emissões totais, irrelevantes.

Neste segundo gráfico para o poluente NOx é visível que o aumento das emissões ao longo dos cenários deve-se aos CAV. Estes mostram também um aumento gradual para maiores taxas de penetração. Embora neste troço haja uma menor ocorrência de para-arrancas, continua a existir uma quantidade elevada, sendo este aumento gradual novamente explicado pelo parâmetro CC8 mais elevado para os CAV. Tal como visto para o CO<sub>2</sub>, os desvios padrão são elevados para todos os cenários. De notar que, para ambos os poluentes, a presença de CAV neste troço provoca um aumento das emissões nos veículos convencionais, diminuindo esse valor ao longo dos cenários.

A comparação entre a percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo VSP e a distribuição dos modos de VSP para os dois veículos é apresentada de seguida na Figura 27. As poucas diferenças existentes nas emissões para as diferentes taxas de penetração dos CAV podem ser explicadas desta maneira pela baixa diferença de comportamento entre os dois veículos, observável pela semelhante distribuição de modos VSP para ambos os veículos.



Figura 27 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na Avenida 25 de Abril

No entanto, e apesar da semelhança a nível comportamental dos dois veículos, é possível realçar algumas diferenças. Assim, é possível identificar uma existência de maior número de modos VSP 4 e 5 para os veículos convencionais e um número maior de modos VSP 10 a 14 para os CAV. Esta diferença, embora ligeira, deve-se à maior capacidade de aceleração dos CAV devido ao parâmetro CC8, como referido anteriormente, e explica o porquê de haver uma maior taxa de emissões para os CAV. O número elevado do modo VSP 3 remete para a existência de um número elevado de para-arrancas. No entanto, comparando com a Avenida Lourenço Peixinho para a qual este modo VSP correspondia a 30%, existe uma diferença bastante grande visto que para este troço este modo ocupa apenas aproximadamente 15% do total de modos VSP.

Também para este troço o número de veículos a circular aumenta ao longo dos cenários com a maior variação entre cenários a verificar-se do cenário CB para o C1. O máximo de aumento do número de veículos é atingido para a taxa de penetração de 90% de CAV (C5) onde existe um aumento de 3% do número total de veículos em comparação com o cenário CB. Este aumento pode também contribuir para as diferenças registadas das emissões de poluentes. Tal como na Avenida Lourenço Peixinho, um maior número de veículos gera mais congestionamento no trânsito levando a um maior número de acelerações e desacelerações.

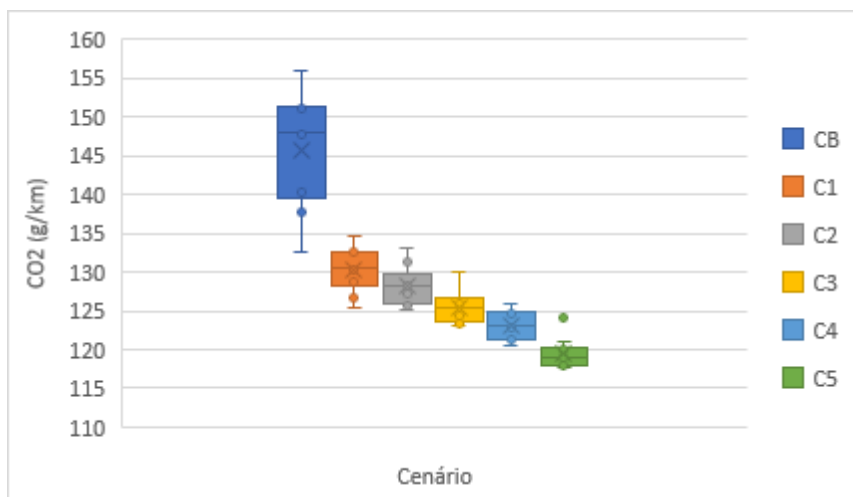
Com a observação dos resultados obtidos para estes dois troços analisados até ao momento, pode-se deduzir que para centros urbanos a inserção de CAV não trouxe benefícios em termos de emissões. Verificaram-se até aumentos relativos das emissões quando o número de para-arranca é muito elevado. Assim, pode-se concluir que, para estes dois troços, os resultados mostram que os parâmetros atribuídos aos CAV não são os ótimos para circulação urbana na rede de Aveiro. Estes resultados negativos podem ser explicados pelo facto de, tal como referido anteriormente, as estradas urbanas onde foram testados estes parâmetros serem mais similares ao troço da estrada nacional.

### **4.1.3 Nacional 109**

Em contraste com os troços anteriormente referidos, a N109 oferece limites de velocidade de 70 km/h para algumas zonas do troço e ausência de sinalização luminosa e passagens de peões, embora apresente também bastantes zonas com limite de velocidade de 50 km/h e um número considerável de interseções e rotundas com possibilidade de criação de situações de para-arranca.

Similarmente aos dois troços anteriores, segue-se uma série de gráficos para analisar o comportamento dos CAV na estrada Nacional 109, começando pela Figura 28 com a comparação de emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> para cada um dos cenários.

a)



b)

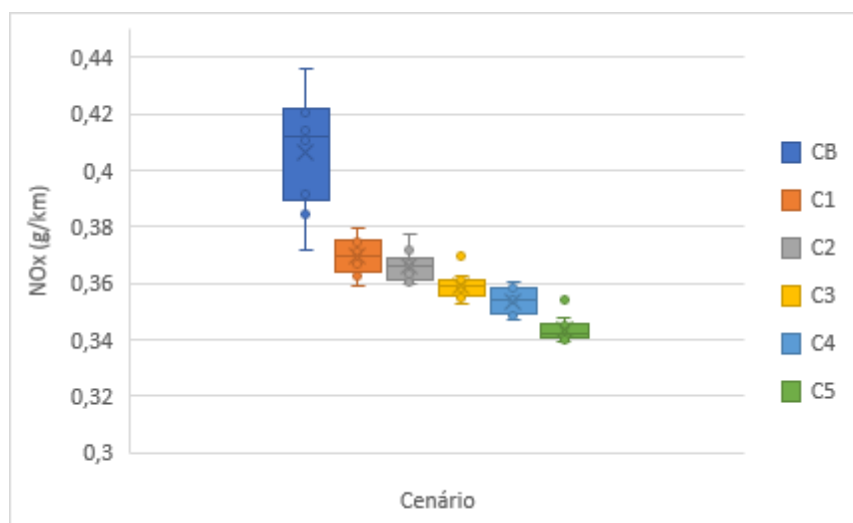


Figura 28 – Comparação das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> em g/km para cada cenário na Nacional 109

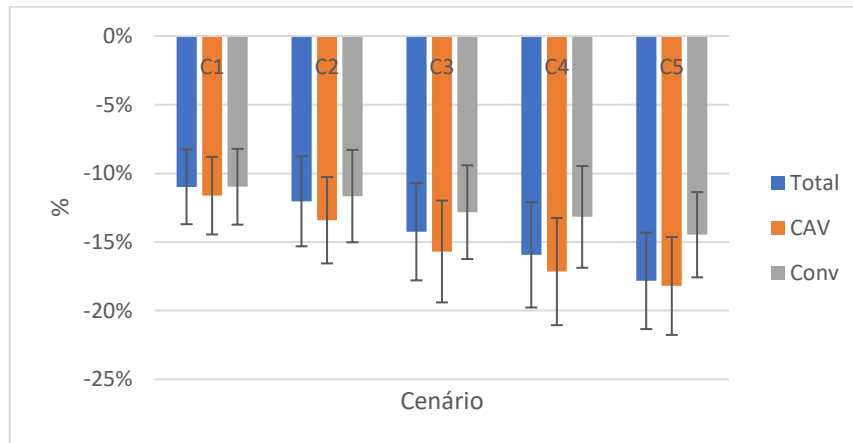
Neste gráfico é possível verificar uma variação de valores muito superior para o CB em relação a todos os outros cenários. Esta situação pode dever-se às características da própria estrada que apresenta zonas distintas ao longo do percurso: zonas com limites de velocidade de 50km/h, zonas com limites de 70 km/h e zonas com interceções/rotundas. Comparando os

cenários, é visível uma diminuição de emissões de CO<sub>2</sub> logo a partir dos valores de penetração de CAV mais baixos com uma significativa redução entre os cenários CB e C1 e aproximadamente 15 g/km. Em termos de valores totais, a redução de emissões de CO<sub>2</sub> chega a mais de 25 g/km. A inserção de CAV gera estabilização do comportamento dos veículos convencionais observável pela diminuição de variação dos valores de emissões, mais propriamente pelo tamanho das caixas.

Fazendo uma análise para o NO<sub>x</sub>, observa-se um comportamento bastante semelhante ao gráfico do CO<sub>2</sub>. Nota-se uma clara influência dos CAV nos veículos convencionais tanto em termos de diminuições nas emissões como diminuição da variação dos valores, provando uma diminuição das acelerações e desacelerações em comparação com o cenário CB. Uma diminuição de 0,04 g/km é conseguida com apenas 10% de CAV a circular na rede. A redução máxima de 0,07 g/km de NO<sub>x</sub> é atingida para o cenário com máxima penetração. Novamente para este poluente as emissões foram diminuindo ao longo dos cenários.

Na Figura 29 a redução do nível de emissões também é visível. Para este troço os CAV provocam uma diminuição de 10% de emissões de CO<sub>2</sub> logo a partir do cenário C1, sendo esta diminuição cada vez mais significativa ao longo dos cenários, chegando a um total de 18%.

a)



b)

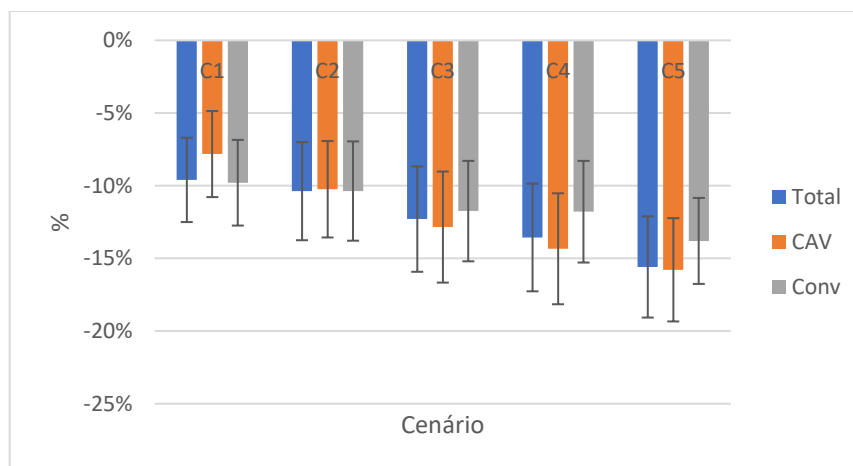


Figura 29 – Comparação percentual das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na Nacional 109

Neste gráfico também são observáveis diminuições das emissões em aproximadamente 10% para os veículos convencionais para o cenário C1, aumentando, também, esse valor ao longo dos cenários, atingindo um valor máximo de 14%. Isto prova uma influência bastante positiva da presença dos CAV no comportamento dos veículos convencionais, mesmo quando se trata de taxas de penetração de CAV baixas. Ao longo do cenário a redução das emissões é visível também para os CAV.

Para o NOx verificamos que as diminuições referidas anteriormente correspondem a 10% de do total de emissões entre o cenário CB e o C1 e de 16% entre o CB e o C5. Apesar do comportamento semelhante ao do CO<sub>2</sub>, duas notações são necessárias. Primeiro, do cenário C2 para o C3 não existe diferença de valores significativa. E segundo, o nível de redução das emissões deste poluente é relativamente parecido para os dois tipos de veículos.

Para ajudar a entender o porquê de existirem reduções tão grandes das emissões de CO<sub>2</sub> e NOx em comparação com o centro urbano é apresentada a Figura 30.

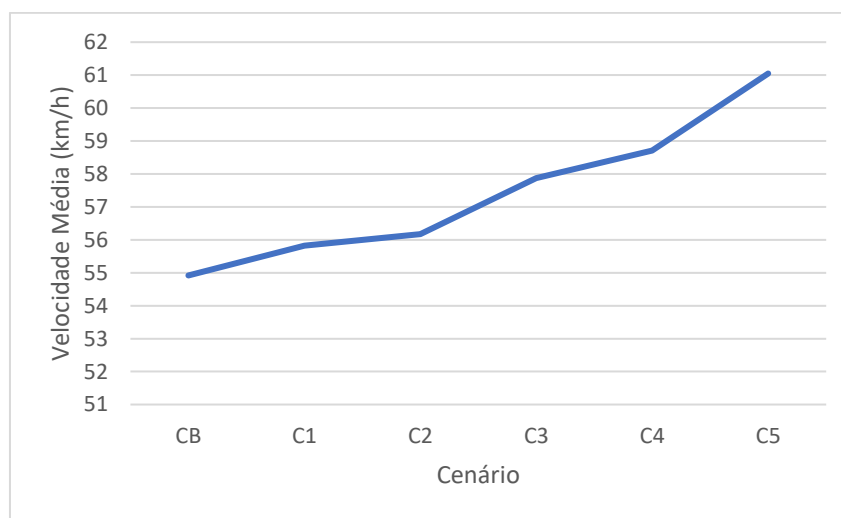


Figura 30 – Velocidade média de circulação ao longo dos cenários na Nacional 109

Com este gráfico é observável a velocidade média dos veículos a aumentar ao longo dos cenários. Este aumento deve-se em grande parte à distância de segurança ser mais pequena, bem como os parâmetros CC4 e CC5 mais pequenos em valor absoluto, que traduzem um menor tempo de reação, levando os veículos a circularem mais perto uns dos outros, o que permite uma subsequente diminuição da densidade de veículos no restante espaço e consequentemente um aumento da velocidade. De um modo geral, as emissões dos veículos variam de forma parabólica crescente com a velocidade, sendo o mínimo atingido para velocidades normalmente compreendidas entre os 70 km/h e os 90 km/h. Assim sendo, a velocidade média ao aumentar de 55 km/h para 61 km/h aproxima-se mais do ponto ótimo de emissões, representando por si só uma contribuição na diminuição das emissões.

Também para este troço é realizada a comparação entre a percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo VSP e a distribuição dos modos de VSP para os dois veículos e mostrada na figura seguinte.



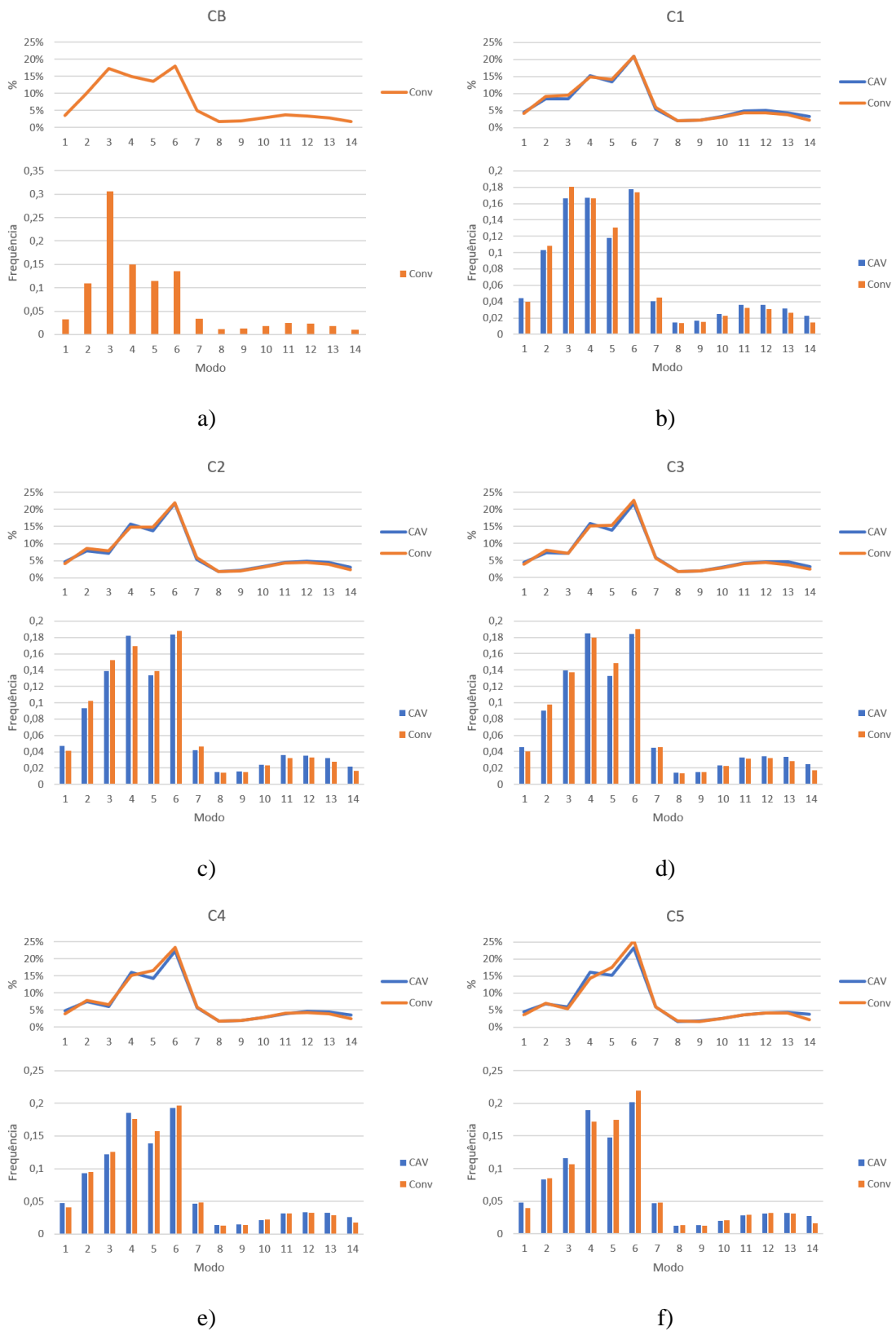


Figura 31 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f) na Nacional 109

Como observável na Figura 31, a primeira característica que chama a atenção é o elevado número de modos VSP 3 que existem para o cenário CB. Ao longo dos cenários, é possível observar uma diminuição do número total deste modo com uma maior diminuição visível entre os cenários CB e C1. Esta redução representa uma diminuição significativa do número de paragens sendo compreensível a redução dos níveis de emissões apresentados previamente. Também entre os cenários CB e C1 se verifica de imediato uma distribuição mais uniforme entre os modos VSP 3 a 6, distribuição essa cada vez mais acentuada ao longo dos cenários. O modo VSP 3, que apresenta um dos maiores contributos para as emissões do cenário CB, dá a vez ao modo VSP 5 e 6 que passam a representar um contributo mais elevado.

Para este troço existe um aumento do número de veículos a circular nas estradas em cerca de 2,5% para taxa de penetração de 10% de CAV. Este valor estabiliza para os outros cenários voltando apenas a aumentar para o cenário C5 onde existe um aumento de 3% em comparação com o cenário CB. Apesar do maior número de veículos a circular existe um menor número de paragens, como referido anteriormente e mostrado pela Figura 31 e pelo modo VSP 3.

Neste troço, quando existe congestionamento, os veículos não passam muito tempo parados, mas sim em oscilações entre velocidades baixas. Deste modo, o parâmetro CC7, que representa a aceleração de oscilação, vai ter um grande impacto na redução das paragens (diminuição das ondas de choque ao longo dos congestionamentos).

Para este troço é bastante clara a influência positiva dos CAV na rede. São obtidas reduções significativas nas emissões de CO<sub>2</sub> e NOx tanto dos CAV como dos veículos convencionais ao longo dos cenários. A partir destes resultados pode-se concluir que os parâmetros utilizados são mais eficientes para vias desta tipologia.

#### **4.1.4 A25**

No que diz respeito à A25, o troço realizado apresenta um perfil de velocidades mais elevado face aos restantes troços em função do limite legal permitido e das características da própria faixa de rodagem. Apesar dos perfis de aceleração se manterem aproximadamente constantes, o perfil de velocidade relativamente elevado provoca uma fatia importante de emissões neste troço. No que diz respeito à velocidade média de circulação, existe uma grande regularidade ao longo do trajeto dos perfis de velocidade contidos na gama dos 100-125 km/h.

Na simulação original, utilizando a rede de Aveiro fornecida, os veículos encontravam-se a circular numa grande parte da autoestrada a velocidades relativamente baixas, na gama dos 80-

90 km/h. Tal ocorrência devia-se principalmente ao facto dos veículos a circular com origem do centro da cidade entrarem na autoestrada a velocidades baixas. Também o facto de ser um troço relativamente pequeno com duas entradas levava a uma grande interferência nos veículos que nela circulavam. Para melhor entender as capacidades dos veículos autónomos a circular em autoestrada e circundar estes problemas existentes na simulação original, foram realizadas duas simulações diferentes da original. Primeiramente, com os veículos todos a circular à mesma velocidade, foi criada uma rede unicamente com a autoestrada e foram retiradas as duas entradas, ficando apenas a via principal com os dois sentidos. O número de veículos a entrar em cada sentido foi de 1200 veículos, valor este que representa o máximo de veículos que circulavam em cada sentido na simulação original. Os parâmetros dos veículos autónomos foram alterados de modo a concordar com os resultados obtidos por Stogios (2018) em que os melhores resultados foram obtidos para parâmetros representativos de uma condução mais agressiva, devido ao menor tempo de circulação. Os valores dos parâmetros são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação dos parâmetros dos CAV anteriormente utilizados e dos seleccionados para este troço; parâmetros identificados com um asterisco (\*) são referentes ao modelo de mudança de faixa

<b>Parâmetro</b>	<b>Vias Urbanas</b>	<b>Autoestrada</b>
<b>CC0</b> [m]	1,47	0,5
<b>CC1</b> [s]	1	1
<b>CC3</b> [s]	-13,54	-4,00
<b>CC4</b> [m/s]	-0,13	-0,10
<b>CC5</b> [m/s]	0,13	0,10
<b>CC7</b> [m/s <sup>2</sup> ]	0,08	0,45
<b>CC8</b> [m/s <sup>2</sup> ]	3,72	3,90
<b>CC9</b> [m/s <sup>2</sup> ]	1,60	1,90
<b>Min. headway (front/rear)</b> [m] *	0,70	0,20
<b>Safety Distance Reduction Factor</b> *	0,21	0,10

Contudo, e após realizadas as simulações de todos os cenários para esta nova rede, os resultados não foram conclusivos. Como se pode observar pela Figura 32, não se verificaram grandes alterações a nível de emissões de poluentes ao longo dos cenários. No entanto, devido ao rácio volume/capacidade relativamente baixo e como todos os veículos estavam a circular a

velocidade semelhante, não existiam interações entre eles, fazendo com que não fosse possível ver diferença de comportamento com os novos parâmetros dos CAV. Assim, como os resultados destas alterações foram insignificantes e inconclusivas foi equacionado um novo cenário.

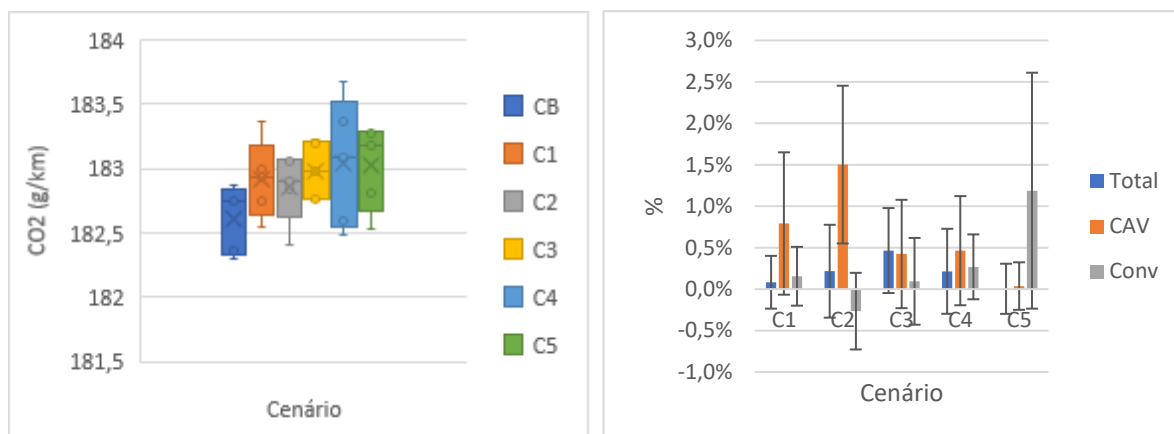
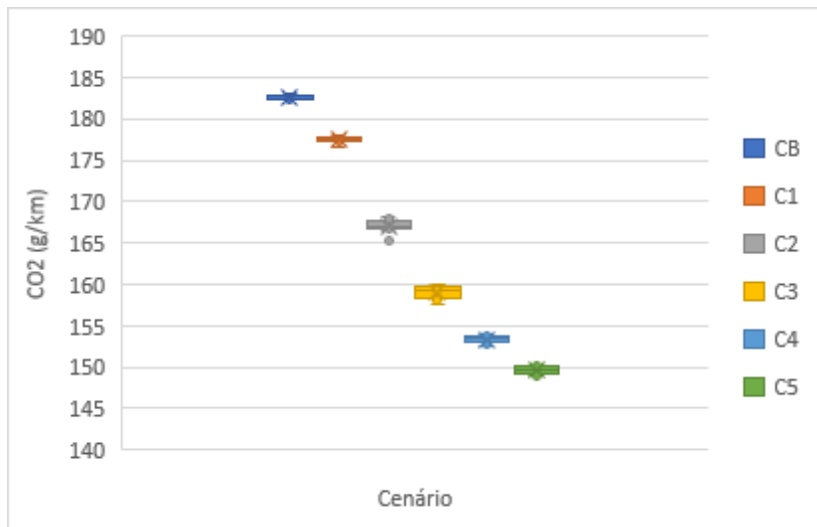


Figura 32 – Comparação das emissões de CO<sub>2</sub> em g/km (direita) e respectivas percentagens (esquerda) para cada cenário na A25

Num segundo cenário, foi considerada a possibilidade de aumentar o número de veículos a circular de modo a observar a influência dos parâmetros dos CAV para a capacidade máxima da estrada. No entanto, esta simulação não refletiria a realidade, pois este troço de autoestrada tem um número relativamente baixo de veículos a circular. Deste modo, decidiu-se alterar o limite de velocidade dos CAV. Assim, com os mesmos parâmetros da Tabela 11, utilizando a mesma rede constituída apenas pela autoestrada, foram inseridos os CAV a circular com velocidades médias de 90 km/h que, após alguns testes e considerações, foi considerado o valor ótimo de circulação para otimização das emissões, visto que 80 km/h já seria um valor muito reduzido para uma estrada com esta tipologia. Esta simulação é baseada no pressuposto de que os CAV podem ser otimizados para circularem de modo a obter uma menor emissão de poluentes e menor consumo de combustível. De salientar que, como referido anteriormente, embora os CAV possam circular a velocidades mais altas em autoestrada graças às suas capacidades de reação, esta situação não contribui positivamente para as emissões. Assim, esta simulação tem o intuito de observar a influência dos CAV, a circularem à velocidade ótima, nos veículos convencionais, que circulam a velocidades mais elevadas.

a)



b)

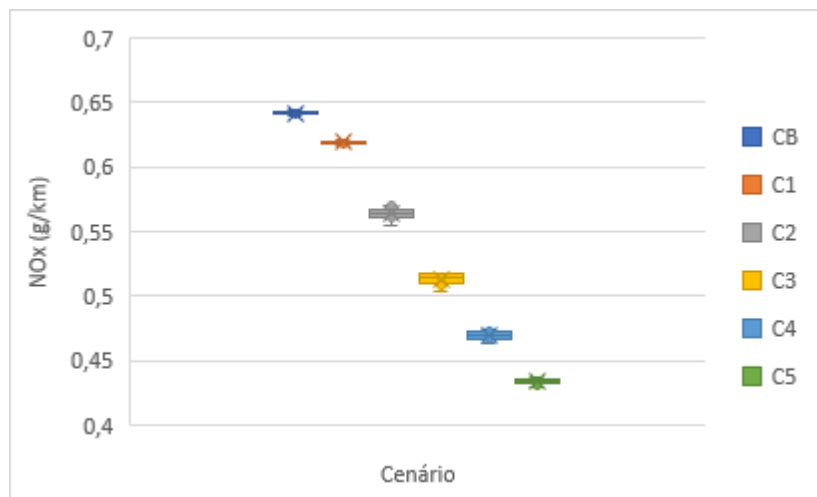


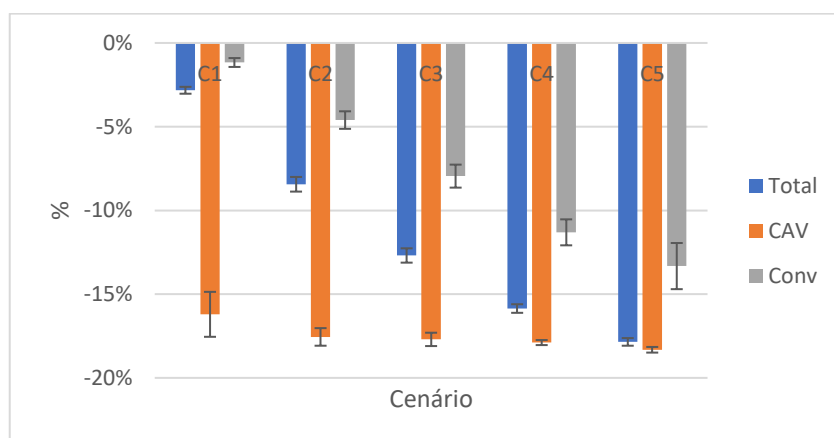
Figura 33 – Comparação das emissões de a) CO<sub>2</sub> e b) NO<sub>x</sub> em g/km para cada cenário na A25

Na Figura 33 a) é apresentado um gráfico com a comparação dos níveis de emissões de CO<sub>2</sub> para o trecho de autoestrada. Nela é perceptível uma variação de resultados muito baixa. Esta ocorrência é normal para velocidades altas e acelerações baixas. Como observável pela Figura 33, as emissões de CO<sub>2</sub> baixam de 183 g/km para aproximadamente 150 g/km. Esta redução de 33 g/km é bastante significativa embora a maior contribuição para essa redução seja o aumento relativo do número de CAV. No entanto, pela Figura 34 a) é observável também uma redução

de emissões para os veículos convencionais tornando-se clara a influência dos CAV com o aumento da penetração.

Para as emissões de NO<sub>x</sub>, tal como para o CO<sub>2</sub>, existe uma clara redução de emissões com o aumento do número de CAV a circular no troço. Também para este poluente os valores apresentam baixa variação para todos os cenários, característica das velocidades altas praticadas em autoestrada e das acelerações e desacelerações relativamente baixas. A redução de emissões é, também para este caso, diretamente proporcional com a taxa de penetração de CAV passando de um valor de 0,64 g/km para 0,43 g/km. Esta redução bastante significativa de 0,2 g/km representa uma diminuição de 32% em relação ao cenário CB como observável pela Figura 34 b).

a)



b)

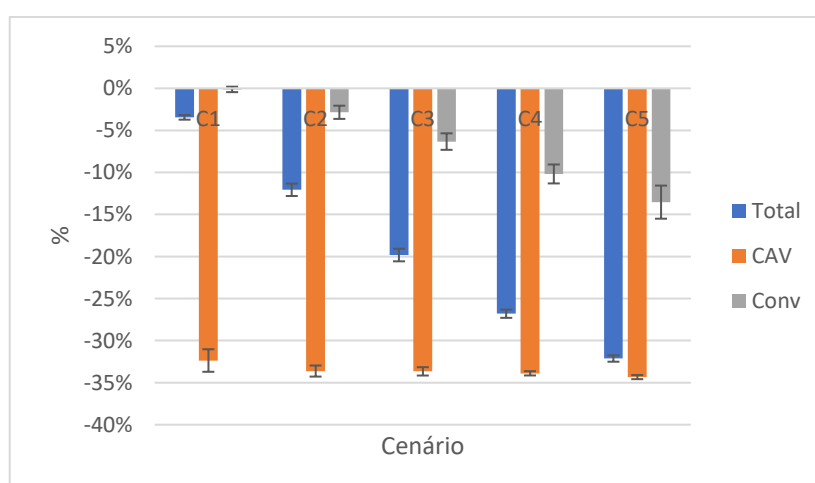


Figura 34 – Comparação percentual das emissões de CO<sub>2</sub> dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5 com o CB na A25

Uma análise mais profunda deste último gráfico mostra uma redução de 18% das emissões totais de CO<sub>2</sub>. Uma clara influência dos CAV nos veículos convencionais é visível e diretamente proporcional com a penetração. A redução de emissões para os veículos convencionais chega aos 13% para o cenário com maior taxa de penetração de CAV. No entanto, uma influência dos veículos convencionais nos CAV para penetrações mais baixas também é aparente. Esta influência, embora relativamente baixa, nota-se devido ao aumento da percentagem de redução de emissões dos CAV ao longo dos cenários. O desvio padrão para os CAV diminui ao longo dos cenários. O contrário acontece com os veículos convencionais. Isto é explicável porque para uma taxa de penetração baixa de CAV, estes estão a ser influenciados pelos convencionais, e para uma taxa de penetração alta de CAV existe uma influência maior destes nos convencionais.

Reduções das emissões de NO<sub>x</sub> de 14% para os veículos convencionais são também perceptíveis neste gráfico. Os CAV, devido às suas velocidades baixas, apresentam uma redução superior a 30% em relação ao cenário base logo a partir de taxas de penetração de 10%. Este valor mantém-se praticamente constante ao longo das simulações não sendo tão clara a influência dos convencionais para penetrações baixas. No entanto, a influência dos CAV é significativa e aumenta com a penetração.

Para este último troço foi novamente realizada a comparação entre a percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo VSP e a distribuição dos modos de VSP para os dois veículos como mostra a Figura 35.

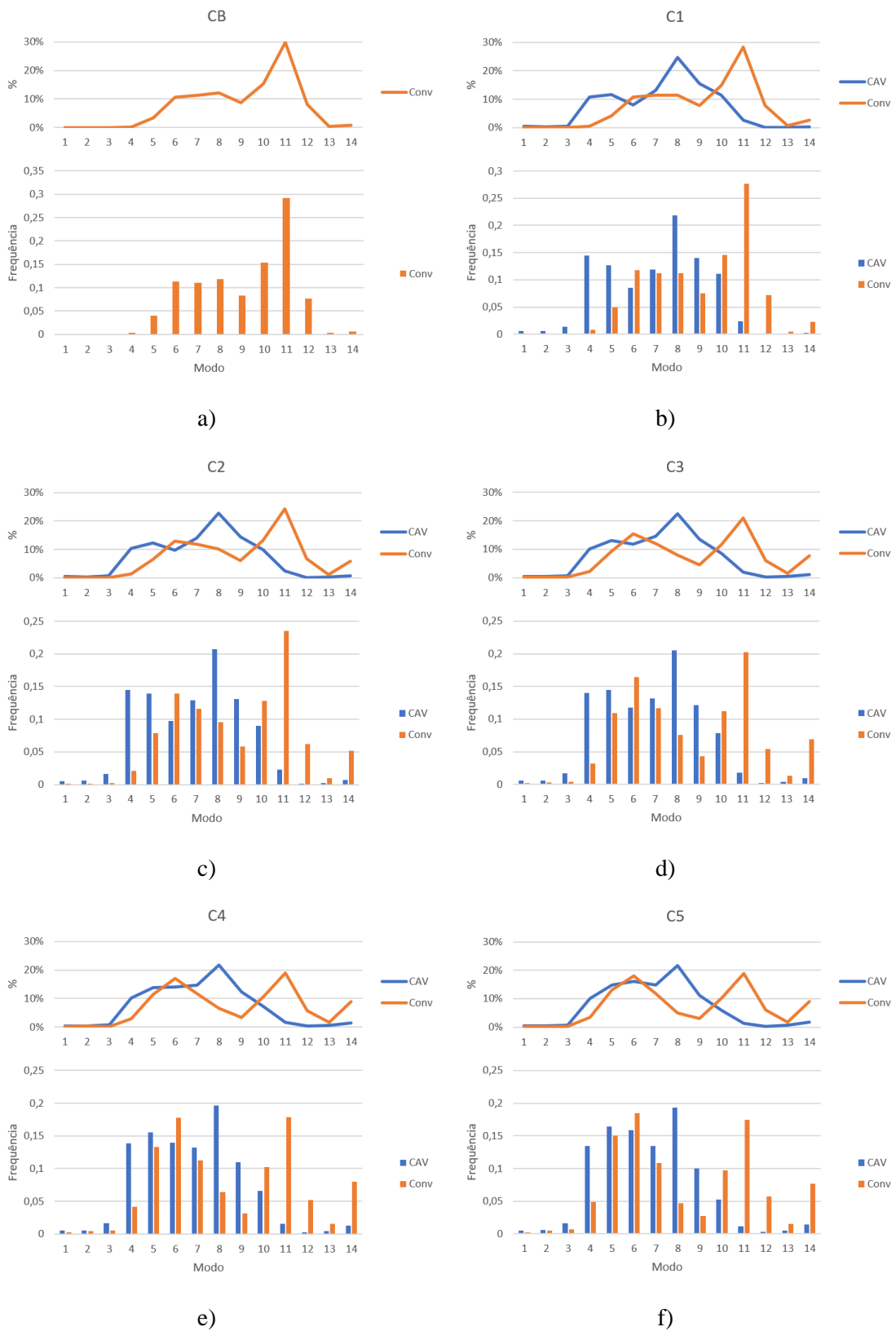


Figura 35 – Comparação entre distribuição de modos VSP e percentagem de emissões de CO<sub>2</sub> para cada modo ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f)) na A25



Pela análise destes gráficos, denota-se que os modos VSP predominantes para os veículos convencionais no CB são os 10 e 11. Ao longo dos cenários é visível a alteração de comportamento dos veículos convencionais influenciados pelos CAV a circular a velocidades mais baixas. Deste modo, a distribuição dos modos VSP dos veículos convencionais torna-se mais uniforme ao longo dos cenários passando a ser os modos VSP 5, 6 e 11 com um maior impacto nas emissões de CO<sub>2</sub>. Para os CAV inicialmente um pico relativamente díspar no modo VSP 8 é visível. No entanto, ao longo dos cenários existe uma crescente distribuição dos modos VSP pelos modos 4 a 9. Esta maior distribuição é também visível pelo arredondamento da linha de percentagem de CO<sub>2</sub> representativa dos CAV para cada modo VSP ao longo dos cenários. Os modos VSP 4 a 9, que são os modos principais dos CAV, são representantes de velocidades de cruzeiro relativamente baixas enquanto que o modo VSP 11 representa velocidades de circulação mais elevadas, às quais os veículos convencionais circulavam no cenário CB como é visível na Figura 36, explicando assim a quantidade elevada de modos VSP 11 para o CB.

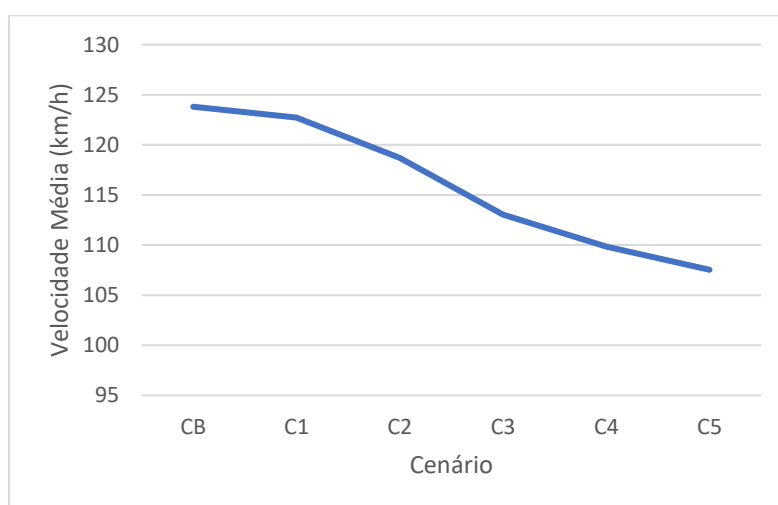


Figura 36 – Velocidade média de circulação dos veículos convencionais ao longo dos cenários na A25

Este gráfico representa a comparação das velocidades médias dos veículos convencionais ao longo dos cenários e serve de ajuda para entender a influência dos CAV nos convencionais. Como se pode verificar pelo gráfico, a velocidade média dos veículos convencionais baixa dos 124 km/h para os 107km/h. Esta redução nas velocidades significa uma redução das emissões. Para este troço o número de veículos a circular não se altera, pois, a estrada encontra-se longe

da capacidade máxima (aproximadamente 4400 vph), havendo poucas interações entre veículos, e o número de veículos injetados em cada ponta da autoestrada era aproximadamente sempre o mesmo (1200 vph).

Devido às poucas interações existentes entre os veículos a circular todos à mesma velocidade, verificou-se que não existiam alterações significativas nas emissões com os novos parâmetros introduzidos. Uma implementação de um limite de velocidade para os CAV teve um resultado bastante positivo, tanto na redução de emissões totais como na redução das emissões dos veículos convencionais, embora uma desvantagem deste limite de velocidade seja o aumento do tempo de viagem em cerca de 25%.

## **4.2 Análise de Perfis de Velocidade**

De forma a avaliar a relação entre velocidades e emissões dos veículos, foram desenvolvidas correlações para ajudar a interpretar melhor certos valores obtidos na secção anterior. Desta forma, as Figura 37 e Figura 38 representam a relação entre velocidade média para os quatro troços estudados e as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, respetivamente, para os seis cenários estudados.

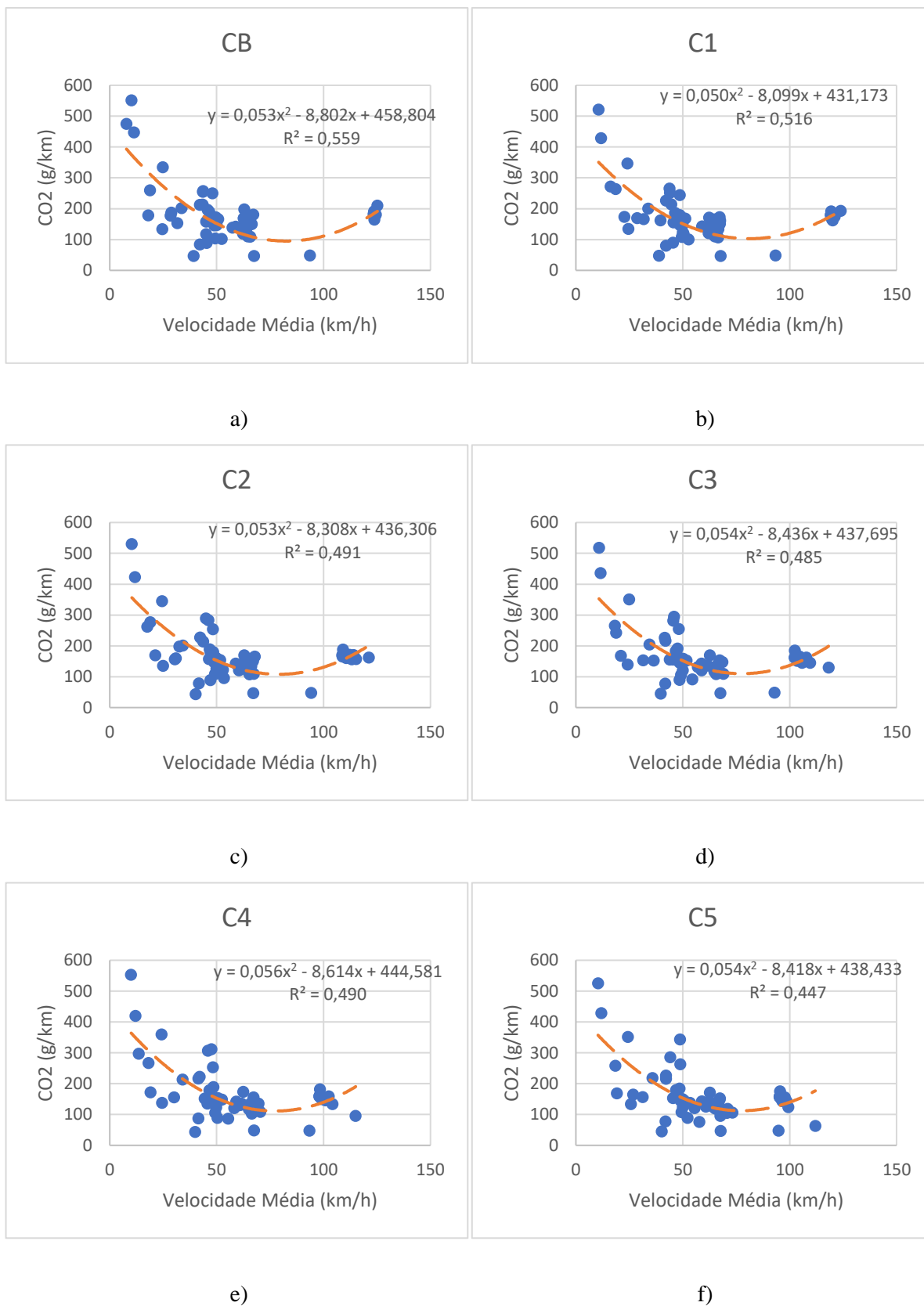


Figura 37 – Comparação entre velocidade média em km/h e emissões de CO<sub>2</sub> em g/km ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f))

Para o cenário CB, a velocidade média justifica quase 56% da variação das emissões de CO<sub>2</sub>. Uma correlação com este valor deve-se principalmente às velocidades mais baixas onde existe uma maior discordância de valores. Isto reflete os diferentes comportamentos dos veículos quando se encontram em velocidades abaixo dos 70 km/h. Esta maior variabilidade das emissões para estas velocidades refletem as características da simulação microscópica que é sensível a acelerações e desacelerações. Para velocidades maiores, existe uma quantidade menor de acelerações e desacelerações, levando a uma variabilidade de valores das emissões menor.

O coeficiente de determinação vai diminuindo ao longo dos cenários chegando a representar, para o cenário C5, apenas 45% das variações das emissões de CO<sub>2</sub>. Isto deve-se a existir uma diminuição da velocidade máxima ao longo dos cenários. Para velocidades máximas mais baixas vão existir acelerações um pouco maiores, aumentando a disparidade de valores. Também para velocidades até os 50 km/h nota-se um aumento da disparidade de valores ao longo dos cenários. Isto mostra as diferenças nas taxas de aceleração dos CAV em relação aos veículos convencionais. Visto que a maior percentagem dos pontos abaixo dos 50 km/h representam os troços da Avenida Lourenço Peixinho e Avenida 25 de Abril, pode-se observar no gráfico o efeito das acelerações mais bruscas conferidas aos veículos autónomos pelo parâmetro CC8.

Para todos os cenários é visível que a velocidade ótima de circulação para obter o menor nível de emissões de CO<sub>2</sub> é entre os 70km/h e os 80 km/h. A maior variabilidade de emissões nos segmentos com velocidade média inferior justifica a pertinência do uso de um modelo instantâneo de emissões, principalmente nas vias urbanas.

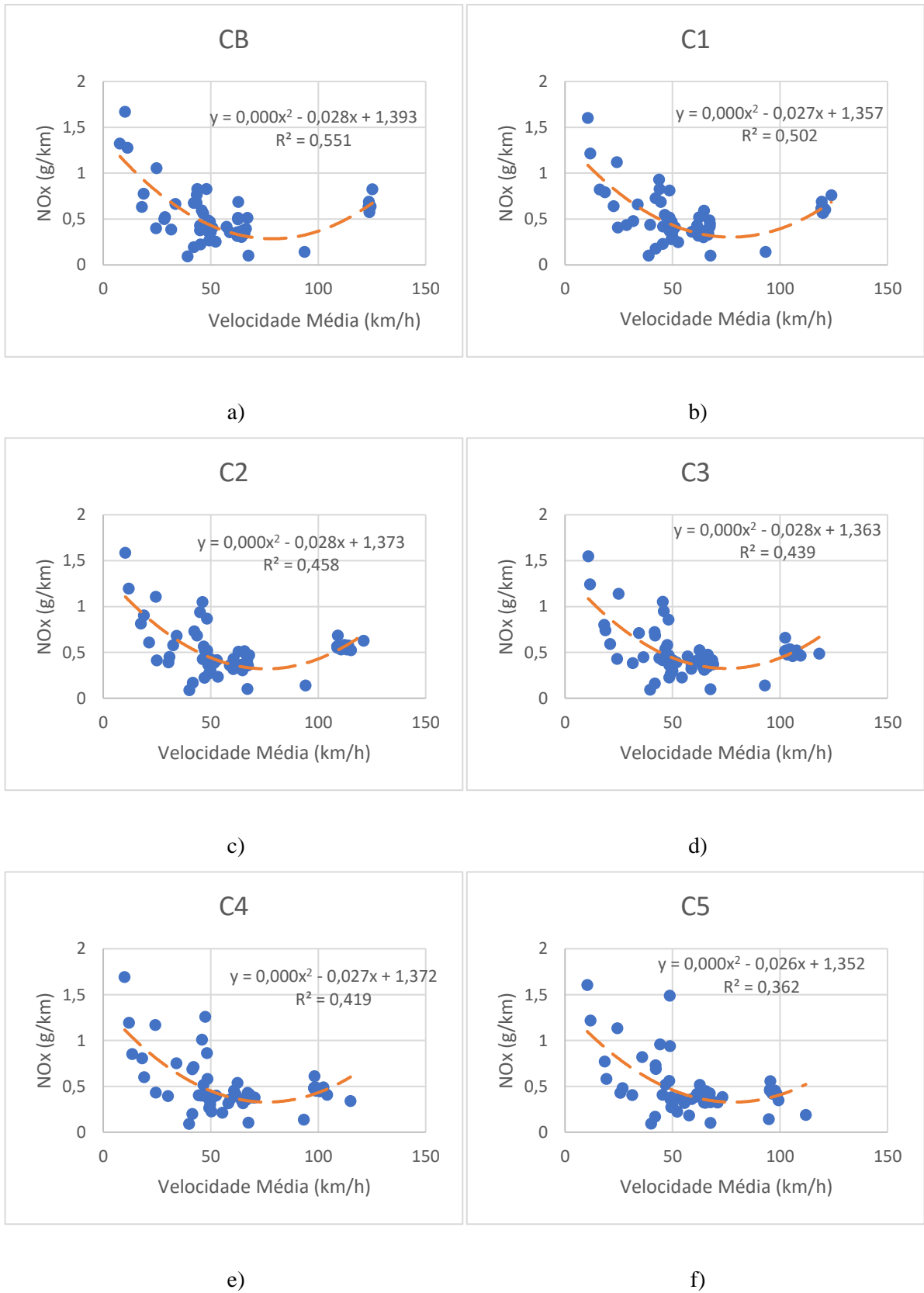


Figura 38 – Comparação entre velocidade média em km/h e emissões de NOx em g/km ao longo dos cenários (CB – a); C1 – b); C2 – c); C3 – d); C4 – e); C5 – f))

Para o NO<sub>x</sub> é obtido um comportamento semelhante ao CO<sub>2</sub>. Inicialmente para o cenário CB a velocidade média justifica até 55% das emissões de NO<sub>x</sub>. Este valor vai diminuindo ao longo dos cenários com o valor mais baixo atingido no cenário C5 onde já só justifica 36% das emissões totais. Uma correlação mais baixa para este poluente já era esperada devido à sua maior sensibilidade às acelerações dos veículos.

Também para este poluente, em todos os cenários é visível que a velocidade ótima de circulação para obter o menor nível de emissões de NO<sub>x</sub> é entre os 75km/h e os 80 km/h.

Com estes gráficos pode-se concluir que a velocidade ótima de circulação para obtenção de melhores resultados em termos de redução de emissões dos dois poluentes considerados será aproximadamente 80 km/h.



## 5. Conclusões e Trabalho Futuro

Na fase final desta Dissertação será realizada uma avaliação sobre os objetivos propostos, comparando-os com os resultados finais obtidos. Por outro lado, será efetuada uma breve reflexão acerca do que não se conseguiu realizar durante o desenvolvimento desta Dissertação e que servirá como potenciais desenvolvimentos ao trabalho realizado.

O trabalho efetuado nesta Dissertação teve como principal objetivo a avaliação e análise do comportamento dos CAV a nível das emissões de poluentes perante troços de vias com características distintas recorrendo à plataforma de microsimulação de tráfego PTV VISSIM. Para atingir tal objetivo foram delineadas metas a atingir tais como:

- Adaptação do modelo VISSIM da rede viária de Aveiro para incluir os CAV;
- Seleção de quatro troços com características distintas na cidade de Aveiro;
- Simulação dos seis cenários diferentes;
- Adaptação e implementação da metodologia VSP aos dados retirados do VISSIM para cálculo das emissões de poluentes;
- Análise dos resultados obtidos e comparação dos dados.

Foi criado um cenário base que serviu de comparação aos outros cenários avaliados. Este cenário é um espelho dos níveis de tráfego presentes atualmente em Aveiro. Todos os cenários comparados a este último corresponderam à implementação de CAV na rodovia. Os parâmetros avaliados foram: emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, distribuições de emissões pelos modos VSP, capacidade das vias e velocidades médias.

Relativamente às conclusões retiradas da análise dos resultados com o desenvolvimento deste trabalho destacam-se as seguintes:

- Em qualquer um dos troços analisados, a taxa de penetração de CAV traduziu-se em alterações dos níveis de emissões de poluentes, exceto para o primeiro caso da A25 onde as diferenças foram irrelevantes;
- Os dois troços pertencentes ao centro urbano apresentam um nível mais elevado de emissões de poluentes devido, principalmente, à existência de sinalização luminosa e interseções que levam a um abundante número de para-arranca;
- Com o aumento da taxa de penetração de CAV na rede, os níveis de emissões de poluentes aumentam para estes dois troços, principalmente para a Avenida Lourenço Peixinho onde existe mais para-arranca;



- No entanto, a Avenida 25 de Abril apresenta valores de emissões mais elevados devido à existência de mais modos VSP 4 e 5, correspondentes a acelerações suaves, e modos 10 a 12 representativos de acelerações elevadas;
- O número relativamente elevado de modos 14 para estes dois troços principalmente para os CAV representa as acelerações muito elevadas entre as velocidades de 40 e 50 km/h, características do parâmetro CC8 referente a acelerações a partir do ponto em que o veículo se encontra parado até à velocidade de cruzeiro;
- Os melhores resultados foram obtidos para a Nacional 109 com 18% de redução das emissões totais de CO<sub>2</sub> e 16% de redução para as emissões totais de NO<sub>x</sub>;
- Para a mesma região o nível de capacidade das estradas aumentou para todos os troços: em 1% para a Avenida Lourenço Peixinho, 2% para a Avenida 25 de Abril e 3% para a Nacional 109;
- É registado um aumento do número de veículos em circulação para estes três troços logo a partir do cenário C1, mostrando que mesmo uma percentagem baixa de CAV (10%) contribui para alterações no comportamento da rede de tráfego;
- Para aos cenários da A25 sem controlo de velocidade, principalmente devido ao facto de o número de veículos estar longe da capacidade máxima da estrada, não existem grandes interações entre veículos a circular à mesma velocidade, provocando uma inconclusividade em relação aos resultados obtidos;
- A implementação de um limite de velocidade provoca resultados bastante positivos chegando a reduções de emissões totais de 18% de CO<sub>2</sub> e 32% de NO<sub>x</sub>;
- Verificou-se uma influência positiva crescente nos veículos convencionais ao longo dos cenários chegando a reduções das emissões de 13% de CO<sub>2</sub> e 14% de NO<sub>x</sub>;
- A relação de emissões e velocidades médias para os quatro troços apresenta grande disparidade de resultados, característica da microssimulação sensível a alterações nas acelerações e desacelerações;
- Os resultados das relações entre a velocidade média e as emissões de CO<sub>2</sub> são bastante satisfatórios e representativos da realidade de onde se retira que a velocidade média justifica quase 56% da variação das emissões de CO<sub>2</sub> para o primeiro cenário diminuindo para 45% para o cenário com maior taxa de penetração.

Existiram várias limitações neste trabalho que levaram a que o resultado final não fosse mais apurado, sendo a principal desvantagem a impossibilidade de testar a teoria com exemplos práticos.

Para os dados analisados foram apenas consideradas as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, não tendo sido feita uma análise para outros poluentes como PM, CO e HC.

Como referido anteriormente, não foi possível estudar o efeito de um maior número de parâmetros diferentes para o comportamento dos CAV, tendo sido efetuadas simulações com resultados obtidos previamente a este estudo. Deste modo, os parâmetros utilizados no VISSIM para simular o comportamento dos CAV foram retirados de um estudo feito no Canadá.

Como trabalho futuro propõe-se:

- Uma alteração dos parâmetros de comportamento dos CAV de modo a, por exemplo, otimizar o comportamento dos mesmos para o centro urbano ou analisar a sensibilidade do efeito da alteração dos parâmetros comportamentais de um subconjunto de veículos na restante rede;
- Novos cenários alternativos com diferentes características, nomeadamente a inclusão de uma via exclusiva de circulação de CAV;
- Novos estudos de caso para centros urbanos mais congestionados;
- Análise mais pormenorizada em termos de quantidade de poluentes e interação dos CAV com os veículos convencionais, partindo do princípio de que os CAV serão maioritariamente veículos de motor elétrico e, por isso, com taxas de emissões de poluentes irrelevantes;
- Incluir programação externa, por exemplo *Matlab*, para simulação das comunicações entre veículos e infraestruturas;
- Testes experimentais com veículos autónomos (assim que legalmente possível).



## Referências Bibliográficas

AHMED, Salman; HOQUE, Modammad A.; KHATTAK, Asad J. - Intersection Approach Advisory Through Vehicle-to-Infrastructure Communication Using Signal Phase and Timing Information at Signalized Intersection. **Transportation Research Board**. January (2018) 1–4.

ALMEIDA, Tiago - **Monitorização Experimental de Rotas Alternativas para Veículos**. [S.l.] : Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2010

ANDERSON, James *et al.* - **Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers** [Em linha] Disponível em WWW:<URL:http://www.rand.org/pubs/research\_reports/RR443-2.html>. ISBN 9780833083982.

BANDEIRA, Jorge *et al.* - A Comparative Empirical Analysis of Eco-Friendly Routes During Peak and Off-Peak Hours. **91th Annual Meeting of the Transportation Research**. November 2011 (2012) 1–19.

BANDEIRA, Jorge *et al.* - Generating emissions information for route selection: Experimental monitoring and routes characterization. **Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations**. . ISSN 15472450. 17:1 (2013) 3–17. doi: 10.1080/15472450.2012.706197.

BANDEIRA, Jorge M. *et al.* - Exploring multiple eco-routing guidance strategies in a commuting corridor. **International Journal of Sustainable Transportation**. 12:1 (2018) 53–65. doi: 10.1080/15568318.2017.1328545.

BANKS, Victoria A.; PLANT, Katherine L.; STANTON, Neville A. - Driver error or designer error: Using the Perceptual Cycle Model to explore the circumstances surrounding the fatal Tesla crash on 7th May 2016. **Safety Science**. . ISSN 18791042. 108:December 2017 (2018) 278–285. doi: 10.1016/j.ssci.2017.12.023.

BAXTER, R. *et al.* - USDOT Automated Vehicles 3.0. **Animal Genetics**. 39:5 (2008) 561–563.

BEDE, Zsuzsanna; NÉMETH, Balázs; GÁSPÁR, Péter - Modeling and Simulation Based Analysis of Multi-Class Traffic with Look-Ahead Controlled Vehicles. **Transportation Research Procedia**. . ISSN 23521465. 27:2017) 593–599. doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.125.

BERG, Vincent A. C. VAN DEN; VERHOEF, Erik T. - Autonomous cars and dynamic bottleneck congestion: The effects on capacity, value of time and preference heterogeneity. **Transportation Research Part B: Methodological**. . ISSN 01912615. 94:2016) 43–60. doi: 10.1016/j.trb.2016.08.018.

COELHO, Margarida C. *et al.* - Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. . ISSN 13619209. 14:2 (2009) 91–99. doi: 10.1016/j.trd.2008.11.005.

COMISSÃO EUROPEIA - Realizar o objetivo de uma mobilidade hipocarbónica Uma Europa que protege o Planeta, capacita os seus cidadãos e defende a sua indústria e os trabalhadores. (2017).

CONLON, James; BALLARE, Sudheer; LIN, Ja - Analysis of Environmental Impacts of Autonomous Vehicles. **Transportation Research Board 97th Annual Meeting**. 915:2018) 1–18.

EILBERT, A., L. JACKSON, G. NOEL, Et Al. - A Framework for Evaluating Energy and Emissions Impacts of CCAV Traffic Microsimulations. **Transportation Research Board 92th Annual Meeting**. . ISSN 03065251. 915:5 (2018) 1–19. doi: 10.1111/bcp.12106.

EUROPEAN UNION - **Statistical Pocketbook 2017: EU transport**. ISBN 9789279195082.

FENG, Yiheng *et al.* - A real-time adaptive signal control in a connected vehicle environment. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 55:2015) 460–473. doi: 10.1016/j.trc.2015.01.007.

FERNANDES, P. *et al.* - The effect of a roundabout corridor's design on selecting the optimal crosswalk location: A multi-objective impact analysis. **International Journal of Sustainable Transportation**. . ISSN 15568334. 11:3 (2017) 206–220. doi: 10.1080/15568318.2016.1237689.

FERNANDES, Paulo *et al.* - The Potential of Metering Roundabouts: Influence in Transportation Externalities. **Transportation Research Record**. . ISSN 21694052. 2018). doi: 10.1177/0361198118774667.

FERNANDES, Paulo; ROUPHAIL, Nagui M.; COELHO, Margarida C. - Turboroundabouts Along Corridors: Analysis of Operational and Environmental Impacts. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. . ISSN 03611981. 2627 (2017) 46–56. doi: 10.3141/2627-06.

FONTES, Tânia *et al.* - Are HOV/eco-lanes a sustainable option to reducing emissions in a medium-sized European city? **Transportation Research Part A: Policy and Practice**. . ISSN 09658564. 63:2014) 93–106. doi: 10.1016/j.tra.2014.03.002.

FREY, H. *et al.* - Methodology for developing modal emission rates for EPA's multi-scale motor vehicle & equipment emission system. **State University for US EPA, Ann Arbor, MI**. October (2002) 18–20.

FREY, H. Christopher; ROUPHAIL, Nagui M. - Measurement and Modeling of the Real-World Activity , Fuel Use , and Emissions of Onroad Vehicles : Policy Implications of Fuels , Technologies , and Infrastructure. **2010 TRB Energy and Environment Research Conference**. 2010).

FREY, H. Christopher; ZHANG, Kaishan; ROUPHAIL, Nagui M. - Vehicle-specific emissions modeling based upon on-road measurements. **Environmental Science and Technology**. . ISSN 0013936X. 44:9 (2010) 3594–3600. doi: 10.1021/es902835h.

GAWRON, James H. *et al.* - Life Cycle Assessment of Connected and Automated Vehicles: Sensing and Computing Subsystem and Vehicle Level Effects. **Environmental Science and Technology**. . ISSN 15205851. 52:5 (2018) 3249–3256. doi: 10.1021/acs.est.7b04576.

GUERIAU, Maxime; BILLOT, Romain; FAOUZI, Nour-Eddin EL - Contribution to the Assessment methodology for Connected and Automated Vehicles on traffic. **97th Annual Meeting of Transportation Research Board for Presentation and publication**. 2017).

HABTEMICHAEL, F.; PICADO-SANTOS, L. - Sensitivity analysis of VISSIM driver behavior parameters on safety of simulated vehicles and their interaction with operations of simulated traffic. **92nd Annual Meeting of the Transportation .... 2013 (2013) 1–17**.

HE, Xiaozheng; WU, Xinkai - Eco-driving advisory strategies for a platoon of mixed gasoline and electric vehicles in a connected vehicle system. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**. . ISSN 13619209. 63:2018) 907–922. doi: 10.1016/j.trd.2018.07.014.

ILGIN GULER, S.; MENENDEZ, Monica; MEIER, Linus - Using connected vehicle technology to improve the efficiency of intersections. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 46:2014) 121–131. doi: 10.1016/j.trc.2014.05.008.

INE, O.; NA INTERNET, I. P. - **Estatísticas dos Transportes e Comunicações 2016**. Lisboa-Portugal : [s.n.]. ISBN 978-989-25-0408-7.

INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA - **Estatísticas do Ambiente 2016**. ISBN 978-989-25-0414-8.

JIA, Dongyao; NGODUY, Dong - Platoon based cooperative driving model with consideration of realistic inter-vehicle communication. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 68:2016) 245–264. doi: 10.1016/j.trc.2016.04.008.

KOCKELMAN, Kara; NICHOLS, Aqshems - Anticipating the Emissions Impacts of Autonomous Vehicles Using the MOVES model. **96th Annual Meeting of the Transportation Research Board**. 2017).

LAZAR, C.; TIGANASU, A.; CARUNTU, C. F. - Arterial Intersection Improvement by Using Vehicle Platooning and Coordinated Start. **IFAC-PapersOnLine**. . ISSN 24058963. 51:9 (2018) 136–141. doi: 10.1016/j.ifacol.2018.07.023.

LIORIS, Jennie *et al.* - Platoons of connected vehicles can double throughput in urban roads. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 77:2017) 292–305. doi: 10.1016/j.trc.2017.01.023.

LIU, Jun *et al.* - Mapping Location-Based Driving Volatility for Connected and Automated Vehicles. 18:November 2017 (2018).

LIU, Jun; KHATTAK, Asad J. - Delivering improved alerts, warnings, and control assistance using basic safety messages transmitted between connected vehicles. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 68:2016) 83–100. doi: 10.1016/j.trc.2016.03.009.

LOWNES, Nicholas E.; MACHEMEHL, Randy B. - VISSIM: A multi-parameter sensitivity analysis. **Proceedings - Winter Simulation Conference**. . ISSN 08917736. 2001 (2006) 1406–1413. doi: 10.1109/WSC.2006.323241.

LU, Chaoru; HU, Liang; DONG, Jing - Ecological Adaptive Cruise Control in a Traffic Stream with Mixed Autonomous and Manually Driven Vehicles. **Transportation Research Board 97th Annual Meeting**. 7:11 (2018).

MARGARIDO, Rui - **O papel da mobilidade pedonal na eficiência energética**. [S.l.] : Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2013

MERSKY, Avi Chaim; SAMARAS, Constantine - Fuel economy testing of autonomous vehicles. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 65:2016) 31–48. doi: 10.1016/j.trc.2016.01.001.

MOHD ZULKEFLI, Mohd Azrin *et al.* - Hardware-in-the-loop testbed for evaluating connected vehicle applications. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 78:2017) 50–62. doi: 10.1016/j.trc.2017.02.019.

O'DRISCOLL, Rosalind *et al.* - Real world CO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions from 149 Euro 5 and 6 diesel, gasoline and hybrid passenger cars. **Science of the Total Environment**. . ISSN 18791026. 621:2018) 282–290. doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.11.271.

PARK, Sangung *et al.* - Experimental Analysis on control constraints for connected vehicles using Vissim. **Transportation Research Procedia**. . ISSN 23521465. 21:2017) 269–280. doi: 10.1016/j.trpro.2017.03.097.

STERN, Raphael E. *et al.* - Dissipation of stop-and-go waves via control of autonomous vehicles: Field experiments. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 89:2018) 205–221. doi: 10.1016/j.trc.2018.02.005.

STOGIOS, Christos - **Investigating the Effects of Automated Vehicle Driving Operations on**

**Road Emissions and Traffic Performance** [Em linha]. [S.l.] : Department of Civil Engineering, University of Toronto, 2018 Disponível em WWW:<URL:https://tspace.library.utoronto.ca/bitstream/1807/89602/3/Stogios\_Christos\_201806\_MAS\_thesis.pdf>.

TALEBPOUR, Alireza; MAHMASSANI, Hani S. - Influence of connected and autonomous vehicles on traffic flow stability and throughput. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 71:2016) 143–163. doi: 10.1016/j.trc.2016.07.007.

TEIXEIRA, João - **Sistemas genéricos de gestão de informação para mobilidade inteligente**. [S.l.] : Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 2016

VINE, Scott LE *et al.* - Automated cars: Queue discharge at signalized intersections with «Assured-Clear-Distance-Ahead» driving strategies. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 62:2016) 35–54. doi: 10.1016/j.trc.2015.11.005.

WADUD, Zia; MACKENZIE, Don; LEIBY, Paul - Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**. . ISSN 09658564. 86:2016) 1–18. doi: 10.1016/j.tra.2015.12.001.

WAN, Nianfeng; VAHIDI, Ardalan; LUCKOW, Andre - Optimal speed advisory for connected vehicles in arterial roads and the impact on mixed traffic. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**. . ISSN 0968090X. 69:2016) 548–563. doi: 10.1016/j.trc.2016.01.011.

XIE, Yuanchang *et al.* - Collaborative merging strategy for freeway ramp operations in a connected and autonomous vehicles environment. **Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations**. . ISSN 15472442. 21:2 (2017) 136–147. doi: 10.1080/15472450.2016.1248288.

ZAROFF, Jonathan G. *et al.* - Regional patterns of left ventricular systolic dysfunction after subarachnoid hemorrhage: Evidence for neurally mediated cardiac injury. **Journal of the American Society of Echocardiography**. . ISSN 15568334. 13:8 (2000) 774–779. doi: 10.1080/15568318.2016.1168497.

ZHAO, Li; SUN, Jian - Simulation Framework for Vehicle Platooning and Car-following Behaviors Under Connected-vehicle Environment. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**. . ISSN 18770428. 96:Cictp (2013) 914–924. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.08.105.

ZOHDY, Ismail H.; RAKHA, Hesham A. - Intersection Management via Vehicle Connectivity: The Intersection Cooperative Adaptive Cruise Control System Concept. **Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations**. . ISSN 15472442. 20:1 (2016) 17–32. doi: 10.1080/15472450.2014.889918.

## Anexos

### Anexo A – Contagem de peões para a Avenida Lourenço Peixinho

Ponto 21 (passadeira)	Fórum – Ourivesaria	Inverso
9:30 – 9:45	0	0
9:45 – 10:00	14	19
10:00 – 10:15	22	34
10:15 – 10:30	28	38
Estimativa (9h30 – 10h30)	85	121



Figura 39 – Passadeira sentido Fórum – Ourivesaria, Fonte: Google



Figura 40 – Passadeira sentido Ourivesaria – Fórum, Fonte: Google

Ponto 23 (passadeira) (Contagem junto à Casa Alvarinho)	Passadeira Próxima		Passadeira Afastada	
	Casa Alvarinho – Edifício Avenida	inverso	Casa Alvarinho – Edifício Avenida	inverso
9:30 – 9:45	1	5	2	3
9:45 – 10:00	9	6	8	21
10:00 – 10:15	17	7	5	17
10:15 – 10:30	18	8	2	20





Figura 41 – Passadeira Junto à Casa Alvarinho, Fonte: Google.



Figura 42 – Passadeira Junto ao edifício Avenida, Fonte: Google.

Ponto 26 (passadeira)	Passadeira Próxima		Passadeira Afastada	
	Ourivesaria – Correios	inverso	Ourivesaria – Correios	inverso
9:30 – 9:45	25	26	23	26
9:45 – 10:00	16	21	16	21
10:00 – 10:15	15	27	15	27
10:15 – 10:30	12	12	12	12



Figura 43 – Sentido Ourivesaria – Correios, Fonte: Google.



Figura 44 – Sentido Correios – Ourivesaria, Fonte: Google.

Ponto 27 (passadeira) Ponto de contagem junto à Loja Chico	Passadeira Próxima		Passadeira Afastada	
	Chico – Loja Indiana	inverso	Chico – Loja Indiana	inverso
9:30 – 9:45	20	13	16	14
9:45 – 10:00	33	16	31	15
10:00 – 10:15	15	13	15	13
10:15 – 10:30	29	23	28	22



Figura 45 – Sentido Chico – Loja Indiana, Fonte: Google.



Figura 46 – Sentido Loja Indiana – Chico (da esquerda para a direita na figura), Fonte: Google.

Ponto 39 (passadeira) (contagem junto à Tricana)	Passadeira Próxima Tricana – Nanzor		Passadeira Afastada Tricana – Nanzor	
		Inverso		Inverso
9:30 – 9:45	2	0	6	3
9:45 – 10:00	2	2	8	4
10:00 – 10:15	3	1	7	1
10:15 – 10:30	4	3	8	1



Figura 47 – Sentido Tricana – Nanzor, Fonte: Google.



Figura 48 – Sentido Nanzor – Tricana, Fonte: Google.

## Anexo B – Contagem de peões para a Avenida 25 de Abril

Tabela 12 – Contagem de peões para a passadeira 1 da Avenida 25 de Abril

	Sentido Universidade - Sé	Sentido Sé - Universidade
9.30h – 9.45h	19	25
9.45h – 10.00h	21	19
10.00h – 10.15h	12	13
10.15h – 10.30h	9	15



Figura 49 – Passadeira 1 da Avenida 25 de Abril

Tabela 13 – Contagem de peões para a passadeira 2 da Avenida 25 de Abril

	Sentido Universidade - Sé	Sentido Sé - Universidade
9.30h – 9.45h	6	5
9.45h – 10.00h	5	2
10.00h – 10.15h	6	7
10.15h – 10.30h	3	5



Figura 50 – Passadeira 2 da Avenida 25 de Abril

Tabela 14 – Contagem de peões para a passadeira 3 da Avenida 25 de Abril

	Sentido Universidade - Sé	Sentido Sé - Universidade
9.30h – 9.45h	4	7
9.45h – 10.00h	4	14
10.00h – 10.15h	10	7
10.15h – 10.30h	3	4



Figura 51 – Passadeira 3 da Avenida 25 de Abril

## Anexo C – Código SQL

```
SELECT *  
FROM vehicle  
WHERE (([VEHTYPE\NAME]= 'Carro 1' or [VEHTYPE\NAME]= 'Autonomous') and  
([LANE\LINK\NO]=156 or [LANE\LINK\NO]=281 or [LANE\LINK\NO]=282 or  
[LANE\LINK\NO]=284 or [LANE\LINK\NO]=299 or [LANE\LINK\NO]=300 or  
[LANE\LINK\NO]=368 or [LANE\LINK\NO]=369 or [LANE\LINK\NO]=370 or  
[LANE\LINK\NO]=373 or [LANE\LINK\NO]=374 or [LANE\LINK\NO]=375 or  
[LANE\LINK\NO] =376));
```